LA ANTIMATERIA

DIRAC

El reflejo oscuro de la materia



NATIONAL GEOGRAPHIC

PAUL A. DIRAC fue, junto con Richard Feynman, el más destacado de la «segunda generación» de científicos que abordaron el estudio de la mecánica cuántica tras el trabajo pionero de Planck y Einstein. La célebre ecuación que lleva su nombre, y que describe con enorme detalle el comportamiento de ciertas partículas, entre ellas el electrón, fue la primera en armonizar la teoría cuántica con la relatividad. De ella se sigue una posibilidad asombrosa: la existencia de partículas que son como un «reflejo» en negativo de las ya conocidas electrón, protón, etc., y que conjuntamente forman lo que se bautizó como «antimateria». Distinguido por su carácter retraído y taciturno, así como por su modestia y su consagración al trabajo, este ingeniero eléctrico británico reconvertido en físico enunciaba así una de las teorías más vanguardistas de la física moderna.

LA ANTIMATERIA

DIRAC

El reflejo oscuro de la materia

NATIONAL GEOGRAPHIC

JUAN ANTONIO CABALLERO CARRETERO es catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear en la Universidad de Sevilla. Desarrolla su trabajo de investigación en las áreas de Física Nuclear Teórica y Física Hadrónica. Colabora con investigadores de distintas universidades españolas, europeas y estadounidenses.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock: 25b, 61b, 123, 151a; Carl D. Anderson/American Physical Society: 109; Archivo RBA: 25a, 33, 44, 49, 107; Piotr Baracz: 149; Cambridge University Press: 146; Benjamin Couprie/Departamento de Energía de Estados Unidos: 121a; Benjamin Couprie/Instituto Internacional de Física Solvay: 101b; Fundación Nobel: 82; Getty Images: 61ai, 101a, 121b, 151b; Instituto Danés de Cinematografía: 61ad; Wilhelm Röntgen: 28; Ferdinand Schmutzer/Museo de Historia de Berna: 20b; François Séraphin Delpech: 47; Smithsonian Institution Libraries: 20a, 52.

ISBN: 978-84-473-7676-6
Depósito legal: B-12134-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

El 13 de noviembre de 1995 se celebró en la abadía de Westminster un acto in memoriam de Paul Adrien Maurice Dirac. En el curso del mismo se le dedicó una sencilla placa, en la que los únicos datos que aparecían eran los años de su nacimiento y muerte, su nombre, la palabra «físico» y una concisa ecuación, su ecuación relativista del electrón. Este carácter tan austero de la placa es un reflejo de la propia personalidad de Dirac, siempre alejado de los focos y la atención pública. Paul Dirac, al contrario de otros prominentes físicos de la época, nunca cultivó las actividades sociales fuera de los estrictos límites de su labor académica. En sus últimos años, cuando su nombre era un referente esencial en el mundo de la física, y de la ciencia en general, tampoco escribió libros generales de divulgación en los que describiese sus ideas filosóficas o su relación con sus colegas. Su vida fue su obra científica y siempre mantuvo una privacidad extrema. Ejemplo de ello es su primera reacción de no aceptar el premio Nobel para evitar la publicidad asociada, y posteriormente, su decisión de aceptarlo tras comentarle Rutherford que la publicidad sería mucho mayor si lo rechazaba.

La personalidad de Dirac explica que fuese un gran desconocido para el público en general. Su fallecimiento, el 20 de octubre de 1984 en Tallahassee (Florida), solo fue recogido en una breve nota de prensa en *The Times*. Sin embargo, Dirac es considerado

por la comunidad científica como uno de los físicos más brillantes de la historia. En el Reino Unido forma parte del trío de grandes físicos, junto a Newton y Maxwell. Por ello, resulta muy difícil de entender que hubieran de transcurrir once años desde su muerte para que su país organizase un acto conmemorativo y se decidiese situar su placa al lado de la tumba de Isaac Newton. Como afirmó Stephen Hawking en el discurso de apertura de aquel acto, «Dirac ha hecho más que nadie en este siglo, con la excepción de Einstein, para hacer avanzar la física y cambiar nuestra imagen del universo. Sin duda alguna, es merecedor de este acto en la abadía de Westminster. Lo que resulta escandaloso es que haya transcurrido tanto tiempo».

A finales del siglo XIX la física se sustentaba sobre dos grandes pilares: la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell. Estas dos grandes teorías permitían explicar la práctica totalidad de los fenómenos naturales. En este contexto es fácil entender la impresión general que existía entre los físicos de aquellos momentos. Básicamente, todo estaba ya construido y lo único que podía hacer un físico era realizar cálculos específicos para resolver problemas concretos o llevar a cabo experimentos más y más detallados, todo ello, por supuesto, dentro del marco general de la mecánica y el electromagnetismo. La física, de este modo, no parecía un campo muy atractivo para los jóvenes estudiantes que querían desarrollar una carrera científica. Solo existían en el horizonte dos «pequeños» problemas a los que lord Kelvin llamó «nubecillas». ¿Quién podía imaginar en aquel momento que esas «nubecillas» traerían consigo la mayor tormenta jamás vista? Así, de la inconsistencia entre Newton y Maxwell surgió la teoría de la relatividad, y la radiación del cuerpo negro, problema conocido desde hacía tiempo, trajo consigo el nacimiento del mundo cuántico. El siglo XX comienza con estas revolucionarias teorías en la física. La teoría de la relatividad fue obra de una sola persona, Albert Einstein; por el contrario, la teoría cuántica necesitó el trabajo y la cooperación de los físicos más brillantes de la época, entre ellos Dirac.

Los primeros años de Dirac coincidieron con estos profundos cambios en la física. El trabajo de Planck sobre la radiación del cuerpo negro, que marcó el comienzo de la teoría cuántica,

apareció en 1900, dos años antes del nacimiento de Dirac. En 1905 Einstein, entre otros trabajos, publicó la teoría especial de la relatividad y explicó el efecto fotoeléctrico. Diez años después, cuando Dirac tenía trece, apareció la teoría de la relatividad general. Dirac vivió todos estos cambios, especialmente los relacionados con la teoría de la relatividad, con enorme interés pero completamente aislado. Sin embargo, a pesar de la capacidad innata de Dirac para las matemáticas, sus estudios de ingeniería eléctrica no hacían presagiar que pudiese jugar ningún papel relevante en el mundo de la física. Como suele suceder, cambios inesperados abren perspectivas nuevas que modifican el devenir de una vida. La profunda crisis económica por la que atravesaba Inglaterra tras el final de la Primera Guerra Mundial impidió a Dirac conseguir un trabajo en el campo de la ingeniería. Por este motivo, completó sus estudios en matemáticas en la Universidad de Bristol y, finalmente, se trasladó a Cambridge para comenzar una vida de estudio en el campo de la física.

Tras su llegada a Cambridge en 1923 se produce un segundo giro en su vida. Dirac se sentía fascinado por la teoría de la relatividad, en especial por la teoría general, que estudió en profundidad durante sus años en Bristol. Su fascinación queda patente en el siguiente comentario que realizó muchos años después: «Si Einstein no hubiese publicado la teoría especial de la relatividad en 1905, otros lo habrían hecho en un plazo muy breve. Sin embargo, la teoría general sería distinta. Es probable que sin Einstein todavía seguiríamos esperándola hoy». Sin embargo, Dirac no pudo cumplir su deseo de seguir profundizando en dicha teoría. El profesor Ebenezer Cunningham, que iba a dirigir su proyecto, decidió no aceptar ningún estudiante, siéndole asignado como nuevo director Ralph Fowler, un experto en la incipiente teoría cuántica. Dirac comenzó entonces a adentrarse en el extraño mundo cuántico, mundo sobre el cual, según sus propias palabras, apenas conocía nada. Necesitó dos años de trabajo y continuo estudio para estar preparado para el gran salto que se avecinaba.

El gran cambio en la vida científica de Dirac se produjo en 1925, tras leer los trabajos de Werner Heisenberg. Estos marcaron el comienzo en la construcción de la nueva teoría cuántica, la de-

nominada «mecánica cuántica». El impacto de Heisenberg en Dirac fue tremendo. Surgió en ese momento el genio creativo de Dirac, quien empezó a publicar sus trabajos seminales que le convirtieron en uno de los fundadores de la nueva teoría. Desde su aislamiento en Cambridge, Dirac desarrolló sus trabajos de modo completamente autónomo y casi secreto. Él mismo comentó cómo se enfrentaba a los problemas: «Gran parte de mi trabajo en aquellos años consistía en jugar con las ecuaciones y ver adonde me había llevado el juego». El resultado fue espectacular. Max Born lo expresó de modo muy gráfico: «Esta fue una de las sorpresas más grandes en mi vida científica. El nombre de Dirac era completamente desconocido. Parecía corresponder a un joven cuyo trabajo resultó simplemente perfecto y admirable». Dirac mantuvo toda su vida este secretismo casi enfermizo. Cuando desarrolló su teoría relativista del electrón, una de sus contribuciones más importantes, sus colegas de la Universidad de Cambridge, incluso los más cercanos, solo se enteraron de ello tras la lectura de la publicación en la biblioteca. En ningún momento, durante los meses de trabajo en el tema, Dirac dejó traslucir ni realizó el más mínimo comentario sobre su objeto de estudio.

El período 1925-1933 en la vida de Dirac se conoce como «período heroico». Sus trabajos le convirtieron en uno de los físicos más importantes de la historia. En solo ocho años pasó de ser un completo desconocido a recibir el premio Nobel. A pesar de la fama, sus hábitos no cambiaron y siguió mostrándose tan lejano e inaccesible como siempre, tanto para el público en general como para sus estudiantes y colegas. Aparte de la física y sus dos grandes aficiones —los viajes y las caminatas por la montaña—, Dirac mostró muy poco interés en otro tipo de actividades o ramas del conocimiento. La vida de Dirac era su trabajo y sus publicaciones científicas, y, por tanto, escribir sobre él es básicamente hablar sobre su obra. Este es el objetivo fundamental de este libro. En los capítulos sucesivos se muestran y explican en detalle sus principales logros científicos. Sin embargo, ninguna obra puede entenderse totalmente sin conocer los hechos esenciales de la vida de su creador.

Los trabajos de Dirac durante el citado «período heroico» modificaron completamente el panorama de la física existente en

su momento y, lo que es más importante, establecieron las bases «fundacionales» de gran parte del desarrollo posterior de la física teórica. De hecho, es prácticamente imposible entender la física actual sin tener en cuenta las contribuciones de Dirac. ¿Cuáles fueron sus principales logros científicos y por qué se consideran tan importantes? Dirac es uno de los creadores de la mecánica cuántica. De forma independiente a sus colegas alemanes, elaboró una nueva formulación de la teoría cuántica, denominada «álgebra cuántica». Dirac proporcionó a la teoría cuántica su marco matemático más riguroso y general; en palabras de Einstein, la «presentación más perfecta de la mecánica cuántica». Su teoría de la transformación engloba las tres formulaciones conocidas de la teoría cuántica: matricial, algebraica y ondulatoria; proporciona un tratamiento unificado y coherente de las mismas e incorpora la interpretación física de la función de ondas. De este modo, Dirac introdujo conceptos y notaciones que forman parte del lenguaje actual de cualquier texto de mecánica cuántica. Todo estudiante de física se enfrenta a la teoría cuántica aprendiendo la denominada «notación de Dirac» ket/bra y estudiando las propiedades de la función δ de Dirac.

El mayor logro científico de Dirac, el descubrimiento que llenó de asombro a todos sus colegas, fue el desarrollo de la ecuación cuántica relativista del electrón y la formulación de la interacción radiación-materia. No es fácil desligar ambos hechos. La teoría relativista aplicada al mundo cuántico mostró claramente el precio a pagar: el número de partículas no se conserva. El principio de incertidumbre de Heisenberg, junto a la equivalencia masa-energía, permite la existencia de procesos en los que se crean y destruyen continuamente partículas. Este hecho estaba contenido implícitamente en la ecuación relativista del electrón, pero el propio Dirac necesitó algunos años para ser consciente de ello. De la ecuación de Dirac surgió el mundo de las antipartículas, y con ello, la forma de explicar y describir cómo interacciona la radiación con la materia. Hoy día hablamos del modelo estándar como el «paradigma» actual de la física. Pensamos en las teorías cuánticas de campos como el marco conceptual y matemático que nos permite describir el comportamiento de la naturaleza a partir

de sus constituyentes fundamentales. El gran logro de Dirac fue poner los cimientos e introducir los conceptos esenciales que harían posible el posterior desarrollo de las modernas teorías cuánticas de campos y partículas elementales.

De la combinación de la ecuación cuántica relativista del electrón y la teoría cuántica de la radiación surgió la electrodinámica cuántica: la teoría que explica el comportamiento de los electrones y antielectrones y cómo estos interaccionan con la luz y entre sí. Este fue el primer ejemplo de una teoría cuántica de campos, y Dirac nos enseñó el camino a seguir. Él fue el primero en hablar de intercambio de fotones en el proceso de interacción entre partículas; él fue el primero en mencionar conceptos como masa y carga efectivas y técnicas de renormalización. Sus trabajos del período heroico constituyen el fundamento de la teoría cuántica de la radiación y sirvieron de inspiración a otros físicos de una nueva generación para que desarrollasen, casi veinte años después, la «nueva» electrodinámica cuántica; la teoría física más precisa que existe en la actualidad. Este fue el gran legado de Dirac, pero también, su decepción más profunda.

El libro *Great Physicists*, escrito por William H. Cropper, recoge biografías de algunos de los físicos más importantes de la historia. Antes de cada biografía, una simple frase intenta sintetizar una cualidad o característica esencial de cada uno de los personajes analizados. En el caso de Dirac, la frase se reduce a una sola ecuación, la misma que aparece en la placa conmemorativa que se colocó en la abadía de Westminster. Pocas veces ha existido tal grado de identificación entre un físico y una simple ecuación, quizá con la excepción de Einstein y su famosa relación entre la energía y la masa. La diferencia fundamental es que todo el mundo conoce la fórmula de Einstein, mientras que la ecuación de Dirac sigue siendo una absoluta desconocida. Tal y como siempre buscó Dirac, se trata de una ecuación formalmente simple y concisa: $(i\gamma \cdot \delta - M)\psi = 0$. Sin embargo, escondía una verdadera sorpresa y la interpretación de sus soluciones trajo consigo una auténtica revolución: la antimateria.

1902 Nace en Bristol (Inglaterra), el 8 de agosto, Paul Adrien Maurice Dirac, hijo de Charles Adrien L. Dirac, emigrante suizo que era profesor de francés.

1918 Comienza estudios de ingeniería eléctrica en la Universidad de Bristol, graduándose en 1921.

1921 Estudia matemáticas aplicadas en la Universidad de Bristol.

1923 Se traslada a Cambridge con una beca del Departamento de Investigación Científica e Industrial. Comienza a estudiar la teoría cuántica bajo la supervisión de Ralph Fowler.

1925 Su vida da un giro inesperado al leer la obra de Heisenberg. Comienza a publicar sus trabajos en mecánica cuántica, convirtiéndose en uno de los «fundadores» de la nueva teoría.

1926 Presenta su tesis doctoral. Primeros viajes a Copenhague y Gotinga. Se publican sus primeros trabajos sobre la interacción radiación-materia.

1928 Aparece su trabajo *Teoría cuántica del electrón*, con la primera ecuación cuántica relativista. Su éxito es espectacular, pero su interpretación conduce a una gran confusión: ¿qué significado tienen las soluciones de energía negativa?

1929 Primer viaje a Estados Unidos y Japón.

1930 Es elegido miembro de la Royal Society. Se publica su libro *Principios de la mecánica cuántica*, que se convierte en un texto de referencia en el campo.

1931 Postula la existencia del antielectrón y del monopolo magnético.

1932 Dirac ocupa la Cátedra Lucasiana de matemáticas en Cambridge.

1933 Premio Nobel de Física compartido con Erwin Schrödinger por el «descubrimiento de nuevas teorías atómicas».

1937 Se casa con Margit Wigner, hermana del famoso físico teórico Eugene P. Wigner y madre de dos niños, Judith y Gabriel. La pareja tendrá dos hijas en común, Mary Elizabeth y Florence Monica.

1939 Se le concede la medalla real de la Royal Society. En los años siguientes es nombrado miembro de las principales academias científicas del mundo.

1969 Se retira de la Cátedra Lucasiana de Cambridge y se traslada a Estados Unidos.

1972 Es nombrado profesor en la Universidad de Florida, en Tallahassee.

1984 Fallece en Tallahassee el 20 de octubre y es enterrado en esa misma ciudad.

CAPÍTULO 1

Primeros años

A finales del siglo XIX se produjo en el ámbito de la física una auténtica revolución con la aparición de la teoría de la relatividad, con su nueva concepción del espacio y el tiempo, y el desarrollo de la teoría cuántica, con sus extrañas y sorprendentes leyes. Los primeros años de Dirac coincidieron con estos profundos cambios.

Los primeros años en la vida de Paul Dirac coinciden con profundos cambios en la física. El sólido andamiaje de la física clásica (la física hasta finales del siglo XIX), dominada por la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell, comenzaba a resquebrajarse, dando lugar a la denominada «física moderna», que incorporaba una nueva visión del mundo con nuevos conceptos y sorprendentes leyes. El cambio que conllevaron las nuevas teorías, la relatividad y la física cuántica, fue tan profundo que afectó a todas las ramas del conocimiento.

La biografía de Dirac corre paralela al desarrollo de ambas teorías. Paul Adrien Maurice Dirac nació el 8 de agosto de 1902 en Bristol (Inglaterra), aunque su nombre ya refleja claramente su ascendencia francesa. Su padre, Charles Adrien L. Dirac, nació en 1866 en Monthey en el cantón, de habla francesa, de Valais, en Suiza. Tras comenzar sus estudios en la Universidad de Ginebra, Charles abandonó el domicilio familiar y hacia 1890 se mudó a la ciudad de Bristol, donde comenzó a trabajar enseñando francés. En 1896 fue contratado por el colegio técnico Merchant Venturer's, y tres años después se casó con Florence Hannah Holten, natural de Bristol. En 1900 nació el primer hijo de la pareja, Reginald Charles Felix, y dos años después, Paul. Su tercer hijo, Beatrice Isabelle Marguerite, nació en 1906. Paul cursaría sus estudios secundarios en el Merchant Venturer's, centro que a partir de 1906 formó parte de la Universidad de Bristol.

La marcha de Charles Dirac del domicilio familiar en Ginebra se produjo como consecuencia de la difícil relación con sus padres. Por este motivo, durante muchos años no mantuvo ninguna relación con su familia en Suiza, a la que ni siquiera informó de su matrimonio ni del nacimiento de sus dos primeros hijos. Solo años después, en 1905, Charles visitó a su madre en Ginebra, llevando con él a su esposa y a sus dos hijos.

Paul Dirac recordaba en su vejez este hecho, señalando que su primer viaje a Suiza coincidió con la explosión de creatividad de Einstein en Berna, localidad cercana a Ginebra. Aquel mismo año, 1905, Einstein publicó sus cinco trabajos, entre ellos, la teoría especial de la relatividad y la explicación del efecto fotoeléctrico haciendo uso de la incipiente teoría cuántica. Veintitrés años después, Paul Dirac sería el primero en combinar ambas teorías.

FORMACIÓN Y CARÁCTER

Charles Dirac nunca renunció a su herencia cultural ginebrina. Mantuvo la nacionalidad suiza, al igual que sus hijos, hasta 1919, año en el que adquirieron la nacionalidad británica. Asimismo, que sus hijos hablaran con él en francés se convirtió en una imposición absoluta. Su fuerte carácter y el aislamiento que impuso a su familia, que apenas tenía relaciones sociales, convirtieron el domicilio de los Dirac en una especie de prisión, en la que las simples conversaciones estaban ausentes. Esto tuvo una profunda influencia en la vida de sus hijos. Paul Dirac lo expresó en 1962 del siguiente modo:

> Durante mi niñez no tuve ningún tipo de vida social. Mi padre impuso que solo podía dirigirme a él en francés. Pensaba que sería beneficioso para mi educación. Al descubrir que era incapaz de expresarme en francés, decidí que era mejor permanecer en silencio que hablar en inglés. De esta forma me convertí en una persona muy silenciosa.

Este comentario expresa con claridad, por ejemplo, la situación durante las comidas en la casa familiar, en las que padre e

hijo se sentaban en silencio en el comedor, mientras que la madre, incapaz de hablar francés, permanecía en la cocina con los otros dos hijos. Aunque existen ciertas dudas sobre las razones reales que se esconden tras una relación tan especial, lo cierto es que la familia rara vez se reunía durante las comidas (Dirac lo expresó en varias ocasiones).

«Las cosas se desarrollaron desde el principio de tal forma que me convertí en una persona muy introvertida.»

— Paul Dirac.

El profundo carácter introvertido de Paul Dirac y su extrema dificultad para relacionarse con los demás fue una constante en su vida. Algunos de sus compañeros en la escuela primaria señalaron su timidez y el escaso contacto que mantenía con ellos. Prácticamente no hablaba con nadie ni participaba en ningún juego ni deporte. La ausencia de relaciones sociales le hizo centrarse en su propio mundo, en el que el estudio de la naturaleza y, en particular, las matemáticas se convirtieron en el centro de su vida. Es indudable que la relación con su padre y la infancia vivida convirtieron a Dirac en la persona que fue. Su retraimiento y timidez hicieron de él una persona muy difícil en el trato personal, mostrando en ocasiones un aparente desinterés y cierta falta de tacto en sus relaciones con los demás.

En 1914, coincidiendo con el inicio de la Primera Guerra Mundial, Paul Dirac comenzó sus estudios secundarios en el colegio Merchant Venturer's, donde su padre era profesor de francés. Algunos testimonios de estudiantes de aquella época señalan el carácter meticuloso y estricto del padre de Dirac, quien hacía uso frecuente del castigo para mantener la disciplina en las clases. La educación impartida en el colegio se centraba fundamentalmente en el estudio de ciencias, lenguas modernas y materias prácticas. En cambio, apenas existían asignaturas relacionadas con las humanidades.

Desde los primeros meses en el colegio, Paul mostró poseer unas cualidades innatas para las asignaturas de ciencias, en especial, las matemáticas. También mostró un especial interés en

FÍSICA CLÁSICA Y FÍSICA MODERNA

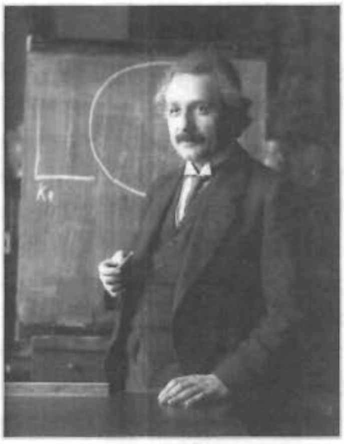
A finales del siglo XIX la física se consideraba una ciencia perfectamente estructurada, capaz de describir los fenómenos más dispares. La mecánica desarrollada por Newton explicaba el movimiento de los cuerpos; la teoría del electromagnetismo de Maxwell podía describir perfectamente los fenómenos eléctricos y magnéticos; el desarrollo de la mecánica estadística, junto con su aplicación a conceptos termodinámicos, y la teoría del átomo habían permitido un avance enorme en la química (la ciencia del siglo XIX). En este contexto se entiende la opinión de lord Kelvin: «No existe nada nuevo que descubrir en física; solo cabe realizar medidas más y más precisas».



William Thomson, lord Kelvin, en 1906.

Los nuevos retos

No obstante, los científicos también eran conscientes de dos pequeñas cuestiones aún sin respuesta. La primera estaba relacionada con cierta inconsistencia entre la mecánica y el electromagnetismo; la segunda era la incapacidad de las teorías existentes para explicar la denominada «radiación del cuerpo negro». La respuesta a la primera cuestión dio origen al nacimiento de la teoría de la relatividad de Einstein con una nueva concepción del espacio-tiempo y la equivalencia masa-energía. La segunda cuestión produjo el nacimiento y desarrollo de la teoría cuántica con sus extrañas leyes en el corazón de la materia y la pérdida de la intuición. El cambio fue de tal profundidad que todas las ramas del conocimiento se vieron afectadas. La física conocida hasta finales del siglo XIX se denomina «física clásica»; con el siglo XX comenzó la era de la «física moderna».



Albert Einstein durante una conferencia en Viena en 1921.

el dibujo técnico y la representación geométrica de figuras tridimensionales. Muchos años después, Dirac manifestó que la capacidad de visualizar geométricamente los problemas fue lo que le permitió desarrollar algunas de sus más importantes teorías en la física. El joven pronto se convirtió en uno de los estudiantes más brillantes del colegio, completando estudios de matemáticas y química mucho más avanzados que los que le correspondían por su edad. Tanto su padre como sus propios profesores percibieron desde el primer momento que Paul poseía una mente especialmente brillante para las ciencias, así como una enorme capacidad de trabajo y concentración. Este hecho influyó en el riguroso régimen de trabajo que Charles Dirac impuso a su hijo durante estos años, lo cual trajo consigo aún un mayor aislamiento.

La casi exclusiva dedicación de Paul Dirac a la ciencia hizo que mostrase una considerable falta de interés por otras ramas del conocimiento, como la literatura o la música. Por otra parte, sus éxitos académicos, junto a su incapacidad para comunicarse y su aparente falta de interés por los problemas o los sentimientos de los demás, fueron minando paulatinamente la autoestima de su hermano. De hecho, la relación entre ambos terminó siendo básicamente inexistente.

En 1918 Paul finalizó sus estudios secundarios con las máximas calificaciones, pero sin ninguna idea determinada de qué hacer en el futuro. A pesar de su especial capacidad para las matemáticas, siguió el ejemplo de su hermano mayor, quien, a pesar de su interés en estudiar medicina, se había visto obligado por imposición paterna a iniciar estudios de ingeniería en la Universidad de Bristol.

MECÁNICA VERSUS ELECTROMAGNETISMO

Para comprender la obra científica de Dirac y sus aportaciones es necesario conocer en qué situación se encontraba la física cuando él era estudiante, ya que fue entonces cuando se produjo el desarrollo de las nuevas teorías que modificaron completamente la visión del mundo natural imperante hasta entonces.

Galileo y Newton establecieron las leyes que permitían describir el movimiento de los cuerpos. Un concepto esencial era el denominado «sistema de referencia», respecto al cual se establece la situación en el espacio y tiempo de uno o varios sucesos. Hasta el siglo XVI se consideraba a la Tierra como un sistema de referencia especial, que se hallaba en reposo absoluto. Galileo (1564-1642) propuso por primera vez que no existía ningún sistema de referencia especial. Por otra parte, uno de los principios fundamentales de la física era el denominado «principio de relatividad» de Galileo o Newton, que establece que todas las leyes de la física (mecánica) son las mismas en todos los sistemas inerciales, aquellos sistemas de referencia que se mueven a una velocidad constante entre sí. Las transformaciones que permiten describir las posiciones de los cuerpos en sistemas inerciales diversos se denominan «transformaciones de Galileo», y en ellas, el tiempo es absoluto, es decir, es el mismo para todos los observadores.

A mediados del siglo XIX el físico británico James Clerk Maxwell (1831-1879) elaboró su teoría del electromagnetismo formulada a través de cuatro ecuaciones fundamentales, denominadas «ecuaciones de Maxwell», en las cuales aparece de forma explícita la velocidad de la luz. La pregunta que surgió inmediatamente fue: ¿la velocidad de la luz, respecto a qué sistema de referencia? De acuerdo con el principio de relatividad de Galileo-Newton, la velocidad depende del sistema de referencia elegido para su determinación. La gran dificultad que se plantea en el electromagnetismo es que la modificación de la velocidad de la luz produce a su vez un cambio en las propias ecuaciones de Maxwell. En otras palabras, las leyes del electromagnetismo sí se modifican frente a las transformaciones de Galileo. Este resultado conduce a una clara inconsistencia entre las leyes del electromagnetismo y las de la mecánica.

En el siglo XIX todos los físicos estaban convencidos de que la luz, al igual que cualquier otro fenómeno ondulatorio, necesitaba un medio material en el que propagarse. A este medio se le denominó «éter», y se supuso que llenaba todo el espacio. El propio éter constituiría de esta forma un sistema especial (absoluto) de referencia, lo cual estaría en contradicción con el principio de relatividad de Galileo. Resultaba esencial medir la velocidad de la luz

respecto al éter, y este fue el objetivo del experimento de Albert A. Michelson (1852-1931) y Edgard Morley (1838-1923) realizado en 1887. El resultado que se obtuvo fue que la velocidad de la luz era exactamente la misma en cualquier dirección espacial en que se midiese. Esto llevó a explicaciones muy diversas, todas ellas relacionadas con la posible modificación de las ecuaciones del electromagnetismo. En un principio, la mayoría de los científicos estaban convencidos de la validez de las ecuaciones de Newton y de las transformaciones de Galileo. Finalmente, surgió la teoría especial de la relatividad en la que el enfoque, y también la solución, del problema eran muy distintos.

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

Albert Einstein (1879-1955) consideró que la inconsistencia entre la mecánica y el electromagnetismo residía en las leyes de Newton. Einstein abandonó la idea del éter y la posible existencia de un sistema de referencia absoluto. La teoría de la relatividad se construye así a partir de dos postulados fundamentales:

1. Principio de relatividad. Todas las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales.

2. Principio de la constancia de la velocidad de la luz. La velocidad de la luz en el vacío es siempre la misma, independientemente del sistema de referencia inercial considerado.

El primer postulado es una generalización del principio de relatividad de Galileo-Newton y pone de manifiesto la imposibilidad de distinguir entre sistemas inerciales. El segundo postulado resulta más extraño y está en clara contradicción con las transformaciones de Galileo, en las que la velocidad de un objeto depende del sistema de referencia en el que se mida. ¿Cómo es posible que observadores que estén moviéndose unos respecto a otros observen el mismo destello luminoso que se desplaza para todos ellos

a la misma velocidad? La respuesta a esta pregunta condujo a una nueva percepción de aspectos tan fundamentales como son los conceptos de espacio y tiempo.

Considérese el concepto de simultaneidad bajo el prisma de la nueva teoría relativista. En la mecánica de Newton el transcurso del tiempo es absoluto y, por tanto, es idéntico para todos los observadores. Por el contrario, en el esquema de Einstein, sucesos simultáneos en un sistema de referencia no lo son, en general, en otro; en otras palabras, la simultaneidad de sucesos depende del sistema de referencia. Este resultado sugiere asimismo que el tiempo puede transcurrir (puede ser medido) de modo diverso en sistemas diferentes.

La conclusión que se obtiene de los postulados de Einstein es que el tiempo medido se dilata para sistemas inerciales en movimiento; es decir, el tiempo transcurre más rápidamente cuando lo medimos en el mismo sistema de referencia en que nos encontramos (que se denomina «sistema propio»). Finalmente, la longitud de un objeto también depende del sistema en el cual se realiza la medida, puesto que medir longitudes implica determinar simultáneamente los extremos del objeto. Einstein hizo un extenso uso de los denominados «experimentos mentales» para poner de manifiesto los aspectos aquí señalados. Aunque los efectos relativistas —contracción de la longitud y dilatación del tiempo— resultan imperceptibles en el mundo cotidiano, en el cual la mecánica de Newton es suficientemente precisa, resultan esenciales para explicar el comportamiento del mundo subatómico.

Un nuevo aspecto que surgió de la teoría de la relatividad y que tuvo un impacto enorme en la teoría cuántica fue el denominado «principio de equivalencia masa-energía». En la teoría relativista, la masa de un cuerpo depende del sistema de referencia, y aumenta con la velocidad del mismo, tendiendo a un valor infinito cuando la velocidad del cuerpo se aproxima a la velocidad de la luz. La relación entre la masa y la energía total de un cuerpo viene dada por la famosa ecuación de Einstein: $E = mc^2$. Esta ecuación describe la equivalencia entre masa y energía, y, por tanto, significa que la radiación o interacción, es decir, la energía, puede transformarse en masa (en partículas) y, a la inversa, las partículas (masa) pueden destruirse produciendo energía. Este hecho

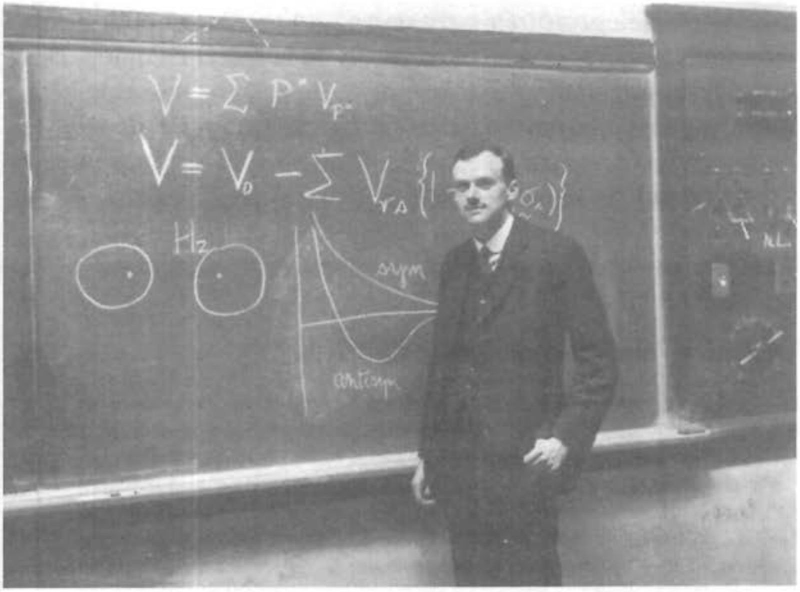


FOTO SUPERIOR:
Dirac en una instantánea tomada en el interior del aula.



FOTO INFERIOR:
Paul Dirac, el quinto por la derecha, junto a otros científicos en el curso del séptimo congreso Solvay, que se celebró en 1933 y estuvo dedicado a la estructura del núcleo atómico.

tuvo implicaciones fundamentales en cómo describir la interacción radiación-materia en el contexto de la teoría cuántica. Dirac fue el primer científico en incorporar de modo consistente la teoría relativista en el marco cuántico. La incorporación de sistemas de referencia no inerciales llevó a Einstein a la teoría general de la relatividad, publicada en 1916.

EFECTOS RELATIVISTAS EN EL MUNDO SUBATÓMICO

El tiempo en el que transcurre un evento o la longitud de un objeto dependen del sistema de referencia inercial en el cual se midan. Estos hechos son una consecuencia de los postulados de la teoría de la relatividad, y resulta fácil obtener las relaciones siguientes:

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0; \; L = \frac{L_0}{\gamma},$$

donde Δt_0 y L_0 representan el tiempo y longitud medidos en el sistema de referencia en el que el evento u objeto se encuentran en reposo. Por el contrario, Δt y L se refieren a las medidas realizadas en un sistema de referencia en movimiento. El término γ se denomina «factor de Lorentz», y su expresión es:

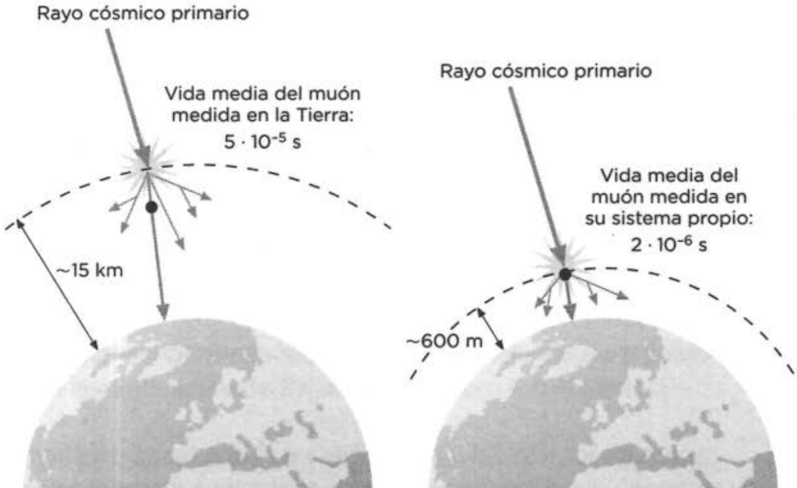
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

En el mundo cotidiano, las velocidades de los objetos (v) son muy pequeñas en comparación con la velocidad de la luz (c). En dicha situación, el factor de Lorentz es prácticamente 1 y, por tanto, no existe ninguna diferencia en las longitudes o transcursos temporales medidos por diversos observadores. Por el contrario, la situación es muy distinta en el mundo subatómico, en el cual, las velocidades pueden ser comparables a la de la luz. En dicho caso, el factor γ es considerablemente mayor que 1, dando lugar a la dilatación del tiempo ($\Delta t > \Delta t_0$) y a la contracción de la longitud ($L < L_0$). Una situación que ilustra este tipo de efectos se muestra en el caso de los muones. Se trata de partículas elementales que se producen cuando los rayos cósmicos (procedentes del espacio exterior) inciden sobre la atmósfera terrestre. Como se muestra en la figura, los muones se crean a una altitud aproximada de unos 15 km, medida desde la superficie terrestre. El tiempo promedio que tardan dichas partículas en desintegrarse, medido en su propio sistema, es aproximadamente $2 \cdot 10^{-6}$ segundos. En la mecánica de Newton, el muón, desplazándose a una velocidad próxima a la de la luz, podría recorrer una distancia media de unos 600-700 m

LA TEORÍA CUÁNTICA: PRIMEROS PASOS

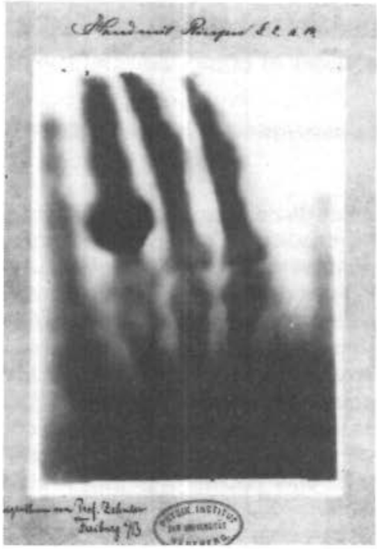
La segunda revolución en la física, con implicaciones aún más profundas que las suscitadas por la teoría relativista, tuvo lugar con el nacimiento del mundo cuántico. La teoría cuántica surgió para explicar el comportamiento del mundo subatómico. La apli-

antes de desintegrarse; por consiguiente, no alcanzaría la superficie terrestre en ningún caso. Sin embargo, los muones llegan en gran número a la superficie de la Tierra. ¿Cómo es esto posible? La explicación la proporciona la teoría de la relatividad. En el sistema inercial de la Tierra, la vida media de los muones es aproximadamente 20 veces superior al valor en su sistema propio. Esto significa que los muones pueden recorrer una distancia de unos 15 km (medida en el sistema terrestre), que coincide con el espesor de la atmósfera que deben atravesar para poder ser detectados en la superficie terrestre. La explicación es similar considerando la contracción de la longitud. En el sistema en reposo del muón, el grosor de la atmósfera se reduce considerablemente resultando unos 600-700 m, longitud que coincide con la distancia media recorrida por el muón durante su vida media medida en su sistema propio.



TRES DESCUBRIMIENTOS SORPRENDENTES

A finales del siglo XIX se produjeron tres descubrimientos inesperados y sorprendentes, que generaron un gran revuelo social y cuya descripción y comprensión solo fue posible muchos años después, una vez que la teoría cuántica se hubo desarrollado. Estos descubrimientos marcaron el inicio de una nueva etapa en la física, que recibirá el nombre de «física moderna». El primero tuvo lugar en 1895, cuando el alemán Wilhelm Röntgen (1845-1923) descubrió los rayos X, los cuales tenían la capacidad de atravesar los objetos y permitir obtener una imagen de los huesos. El descubrimiento creó una excitación enorme y su uso empezó a popularizarse mucho antes de saber en qué consistían realmente dichos rayos. Al año siguiente, 1896, el físico francés Henri Becquerel (1852-1908) descubrió de forma accidental otro tipo distinto y desconocido de radiación, la radiactividad, cuya descripción requería conocer la estructura más interna de la materia. Por último, en 1898 el británico Joseph John Thomson (1856-1940) descubrió los electrones como constituyentes esenciales de la materia y portadores de carga eléctrica. Estos tres descubrimientos, que se adelantaron en varios años al trabajo de Max Planck (1858-1947) sobre la radiación del cuerpo negro, formaron parte del germen de la nueva y revolucionaria teoría cuántica que comenzó a construirse en los años siguientes.



Primera radiografía realizada por Röntgen, que corresponde a la mano de su esposa.

cación de las leyes de la mecánica y el electromagnetismo a tales sistemas constituyó un desastre: toda clase de predicciones estaban en completo desacuerdo con las evidencias experimentales.

Se acepta generalmente como fecha de nacimiento de la teoría cuántica el año 1900, cuando Max Planck publicó su trabajo

sobre la radiación del cuerpo negro. La teoría clásica de la radiación era incapaz de describir el comportamiento de las medidas experimentales en el caso de frecuencias altas. Planck consiguió explicar satisfactoriamente los resultados experimentales con la siguiente hipótesis:

> La radiación se emite o absorbe en múltiplos enteros de una cierta cantidad límite, el «cuanto».

Esta explicación, que el mismo Planck consideró difícil de aceptar, suponía un cambio radical respecto a todas las teorías preexistentes. Era la primera vez en la ciencia que se admitía que la radiación, es decir, la energía, solo podía emitirse o absorberse en forma discreta. Algunos años después, en 1905, Einstein extendió la hipótesis de Planck a todo tipo de energía y de procesos, y consiguió explicar el efecto fotoeléctrico. Este fenómeno consiste en que al incidir radiación sobre ciertos materiales se observa la emisión de electrones. Sin embargo, dicha emisión —o su ausencia— no depende de la intensidad de la radiación incidente, como ilustraba la teoría clásica, sino de la frecuencia de la misma. La hipótesis de Einstein fue considerar que la luz estaba constituida por partículas de energía dada, denominadas «fotones» (los cuantos de Planck). Einstein recibió por este trabajo el premio Nobel en 1921.

A pesar de la sencilla explicación de Einstein, su hipótesis significaba de alguna forma un regreso a la teoría corpuscular de la luz. Esto parecía estar en contradicción con la teoría ondulatoria, la cual se hallaba perfectamente asentada. ¿Cómo describir la interferencia de la luz con una teoría corpuscular? La situación existente en aquellos años era muy confusa, y en este contexto puede entenderse la afirmación del físico americano Robert A. Millikan (1868-1953) sobre la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico:

> Dediqué diez años de mi vida a comprobar la teoría de Einstein. Contrariamente a todas mis expectativas, en 1915 tuve que admitir de modo inequívoco su validez, a pesar de que parecía ir en contra de todas aquellas propiedades que se conocían sobre la interferencia de la luz.

El descubrimiento del electrón por Thomson en 1898 llevó inmediatamente a la pregunta siguiente: ¿cómo están constituidos los átomos? El hecho de que fuesen neutros implicaba que debía existir dentro de cada átomo un número igual de partículas positivas al número de electrones. La respuesta a la estructura atómica vino de Ernest Rutherford (1871-1937) y sus famosos experimentos de dispersión realizados en 1911-1912. Dichos experimentos hacían uso del fenómeno de la radiactividad descubierto algunos años antes por Becquerel.

El análisis de las medidas experimentales llevaba a una conclusión evidente: prácticamente la totalidad de la masa de los átomos se encontraba concentrada en un espacio central cuyas dimensiones eran unos cinco órdenes de magnitud menores que el tamaño atómico. Surgió de esta forma el concepto de núcleo atómico en el que se hallan contenidas todas las cargas positivas (los protones). Por su parte, los electrones se encuentran girando en órbitas determinadas alrededor del núcleo. Este modelo «planetario» presentaba, no obstante, un problema importante: no podía explicar la estabilidad de los átomos. Toda partícula cargada en movimiento circular emite energía. Por consiguiente, los electrones en sus órbitas deberían ir acercándose progresivamente al núcleo hasta colapsar, un hecho absolutamente en desacuerdo con la naturaleza.

Una primera solución a estos problemas la proporcionó en 1913 el físico danés Niels Bohr (1885-1962) al desarrollar el primer modelo cuántico del átomo. Este modelo se basa en los dos postulados siguientes:

1. El electrón se encuentra en órbitas en las que no emite radiación y, además, su momento angular está cuantizado, es decir, solo puede tener valores discretos. A estas órbitas se las denomina «estados estacionarios».

2. La energía, al pasar un electrón de un estado estacionario a otro, viene dada por $\Delta E = hv$, donde h es la denominada constante de Planck —establecida en 1900—, y v, la frecuencia de la radiación.

Con el primer postulado se explica la estabilidad atómica; con el segundo se entiende qué sucede en el efecto fotoeléctrico. El modelo de Bohr aplicado al átomo más simple, el de hidrógeno, consiguió explicar y reproducir perfectamente su espectro energético. Además, el modelo constituyó la primera aplicación de la incipiente teoría cuántica a la estructura de la materia. Su éxito fue indiscutible aunque también presentaba carencias importantes. Con Bohr se completó una primera etapa en la teoría cuántica, en la que se habían presentado postulados esenciales consiguiendo explicar algunos hechos del mundo atómico. Sin embargo, muchas otras evidencias experimentales de aquellos años no tenían explicación ni con el modelo de Bohr ni con las posteriores modificaciones realizadas por el físico alemán Arnold Sommerfeld (1868-1951). La física se encontraba en una encrucijada, en la que solo los más jóvenes y brillantes físicos fueron lo suficientemente atrevidos para crear una nueva visión del mundo natural, una visión completamente distinta y alejada del sentido común.

LA UNIVERSIDAD DE BRISTOL

Paul Dirac comenzó sus estudios en la Universidad de Bristol como alumno de ingeniería. Aunque su especial capacidad para las matemáticas parecía indicar que este sería su camino, su falta de iniciativa y, sobre todo, la imposición paterna hicieron que siguiese los pasos de su hermano mayor. La formación que adquirió durante los tres años que permaneció en la universidad como estudiante de Ingeniería Eléctrica estuvo centrada en materias de ciencias, pero con un marcado carácter aplicado: análisis de materiales, circuitos y dispositivos eléctricos, ondas electromagnéticas, etc. Aunque todas estas materias le permitieron adquirir un conocimiento más profundo de las matemáticas y las ciencias naturales, los planes de estudio de ingeniería no incluían referencia alguna a ninguno de los avances más recientes en la ciencia, y en especial, en la física, tales como la teoría de la relatividad o la incipiente teoría cuántica.

En 1919, durante el segundo año de Dirac en la universidad, se produjo un hecho que tendría una influencia importante en su vida. El 7 de noviembre algunos periódicos se hicieron eco de las medidas llevadas a cabo por una expedición científica británica a la isla africana de Príncipe que estuvo dirigida por los astrónomos Frank W. Dyson y Arthur S. Eddington. Durante un eclipse solar, ambos científicos midieron cuidadosamente el desplazamiento de la posición relativa de una estrella, comprobando que sus mediciones no concordaban con la predicción de la mecánica de Newton, pero se ajustaban perfectamente a la de la teoría general de la relatividad desarrollada por Einstein. Esta teoría predecía que la luz procedente de la estrella era curvada debido al campo gravitatorio solar, de modo que la posición aparente de la estrella debía aparecer desplazada.

La noticia se extendió rápidamente por toda la sociedad convirtiendo a la teoría de la relatividad y su autor, Albert Einstein, en verdaderas celebridades. Todo el mundo empezó a hablar sobre esta nueva revolución científica, pero, ¿en qué consistía realmente? Pocas personas, ni siquiera el propio Dirac, podían contestar a dicha pregunta. No obstante, Dirac se sintió fascinado desde el primer momento, y su objetivo fundamental a partir de entonces fue estudiar y llegar a comprender la nueva teoría. No fue fácil. En aquellos años muy poca gente conocía realmente la teoría de la relatividad y muy pocos textos contenían material suficiente como para poder profundizar en ella. Hubieron de transcurrir varios meses antes de que Dirac pudiese encontrarse de nuevo con la teoría de Einstein.

Durante el curso 1920-1921, el filósofo Charlie Dunbar Broad, que entonces era profesor de la Universidad de Bristol, impartió un curso sobre relatividad, tanto especial como general, al que asistió Dirac. Aunque el contenido esencial del curso se centró en los aspectos filosóficos de la teoría, y no tanto en su formulación matemática, como hubiese preferido Dirac, la relatividad y la relación entre las coordenadas espaciales y el tiempo se convirtieron para él en una obsesión. Durante los meses siguientes, Dirac estudió en profundidad el texto que Eddington publicó ese mismo año: *Espacio, tiempo y gravitación.* En los años siguientes se-

LA GRAN APORTACIÓN DE HAMILTON



Sir William Rowan Hamilton (1805-1865) fue un matemático, físico y astrónomo irlandés que reformuló las ecuaciones de la mecánica de Newton haciendo uso del cálculo de variaciones y el principio de mínima acción: en todo fenómeno natural la cantidad denominada «acción» tiende a ser minimizada; en otras palabras, si un objeto se desplaza de un punto a otro, la trayectoria seguida por el mismo es aquella en la que la acción toma un valor estacionario. La acción se define a partir de la denominada «densidad lagrangiana», que viene dada como la diferencia entre la energía cinética y potencial del sistema considerado. La formulación de Hamilton se convirtió en una herramienta muy poderosa en el estudio de las ecuaciones de movimiento, extendiéndose su uso en el análisis de sistemas cuánticos.

Los cuaterniones

Hamilton también introdujo el concepto de «cuaternión»: una tétrada de números que se representa en la forma $q=a+bi+cj+dk$. El 16 de octubre de 1846, mientras paseaba por el Canal Real, en Dublín, encontró la relación fundamental que permitía definir la regla de multiplicación de cuaterniones: $i^2=j^2=k^2=ijk=-1$. El producto de cuaterniones no satisface la propiedad conmutativa; es decir, el resultado del producto depende del orden de los factores. Hamilton estaba convencido de la importancia de los cuaterniones como herramienta básica tanto en la física como en las matemáticas. Durante el resto de su vida su trabajo se centró casi de forma exclusiva en la aplicación de los cuaterniones a la dinámica, la óptica, la astronomía. A pesar de ello, su uso cayó en el olvido con el desarrollo del análisis vectorial. La formulación de Heisenberg de la mecánica cuántica con el álgebra no conmutativa de los operadores parecía estar relacionada directamente con los cuaterniones; sin embargo, la práctica totalidad de estudios hicieron uso del lenguaje de matrices (en realidad, ambas representaciones son equivalentes). Dirac desarrolló su teoría del electrón relativista sin mención alguna al concepto de cuaternión, aunque conocía perfectamente su existencia desde sus años de estudiante en la Universidad de Bristol. En cierta ocasión, un estudiante le preguntó: «Profesor Dirac, ¿alguna vez pensó en el uso de los cuaterniones cuando estaba desarrollando la ecuación relativista del electrón?». Tras unos interminables instantes de espera, en los que Dirac parecía estar concentrado en sus recuerdos, su respuesta fue: «No». Aquí terminó la conversación; Dirac en estado puro.

guiría profundizando en la teoría hasta dominarla por completo. La relatividad siempre estuvo presente en la mente de Dirac, y no puede entenderse ni su trayectoria científica ni su propia obra sin aceptar esta idea.

Dirac se graduó en Ingeniería Eléctrica en 1921 con las máximas calificaciones en materias teóricas. En cambio, sus resultados en asignaturas tecnológicas y de carácter más aplicado fueron bastante más bajas. Su peor informe correspondió a las prácticas de trabajo que realizó en una fábrica de la ciudad de Rugby en el verano de 1920. En esa misma localidad vivía su hermano mayor, quien trabajaba como aprendiz en una fábrica. Los testimonios que algunos compañeros de trabajo de esa época realizaron años después pusieron de manifiesto el enorme grado de deterioro en la relación entre ambos hermanos.

Debido a la profunda crisis económica por la que atravesó Gran Bretaña tras la Primera Guerra Mundial Dirac no pudo conseguir trabajo como ingeniero. Por ello, en septiembre de 1921 comenzó los estudios de matemáticas en la Universidad de Bristol. Durante los dos años siguientes, hasta el verano de 1923, toda su vida se redujo al estudio y el conocimiento de las ciencias, en particular, las matemáticas y la física. Sus cualidades innatas y su obsesión por el trabajo le permitieron completar los estudios en solo dos años. Durante este tiempo profundizó en la rama de geometría descriptiva y realizó estudios avanzados sobre la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell. Aprendió también la nueva formulación de la mecánica clásica introducida por William R. Hamilton. En los años siguientes, la denominada «formulación hamiltoniana» sería esencial en su construcción de las leyes fundamentales de la teoría cuántica. Por último, Dirac completó también varios cursos sobre teoría de la relatividad y teoría atómica.

En el verano de 1923 finalizó sus estudios en la Universidad de Bristol y consiguió una beca de investigación en la Universidad de Cambridge. Se inició así una nueva etapa en su vida, tanto en el plano personal, viviendo por primera vez fuera del domicilio familiar y lejos de la influencia de su padre, como en el profesional, comenzando a desarrollar su carrera como científico.

LA UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE

Nada más conocer su admisión en la Universidad de Cambridge, Dirac solicitó trabajar bajo la supervisión del profesor Ebenezer Cunningham (1881-1977), un experto en teoría electromagnética y relatividad. Dirac persistía en su idea original de seguir profundizando en la teoría de Einstein. Sin embargo, Cunningham no aceptó ningún estudiante aquel año, de modo que a Dirac se le asignó un nuevo director, el profesor Ralph Fowler (1889-1944). Este cambio tuvo una influencia enorme en la vida de Dirac y en el propio desarrollo de la física durante los años siguientes. Cunningham era un profesor de la vieja escuela, mientras que Fowler, hijo político de Rutherford, era el principal exponente de la física teórica en Cambridge y el único que mantenía contacto frecuente con los principales centros de investigación de Alemania y Dinamarca, especialmente el círculo de Niels Bohr, donde había surgido y seguía desarrollándose la teoría cuántica.

Al contrario de Bristol, Cambridge era un lugar con una gran tradición científica, donde trabajaban investigadores y profesores de gran renombre: Larmor, Thomson, Rutherford, Eddington, Fowler... Dirac, además, coincidió con jóvenes estudiantes que alcanzarían un gran reconocimiento en los años siguientes: Chadwick, Blackett, Hartree, Kapitsa, Lennard-Jones, Thomas, Slater, Lemaitre... De este modo, la Universidad de Cambridge era en aquellos momentos un centro muy estimulante. Existían numerosos clubs que desarrollaban una importante actividad científica: organizaban reuniones para discutir nuevos descubrimientos, invitaban a reconocidos investigadores para dar charlas, realizaban visitas a laboratorios donde tenían lugar experimentos importantes. Entre todos estos clubs, Dirac participó con cierta asiduidad en dos. El primero, conocido como $\nabla^2 V$, estaba centrado en física matemática; el segundo fue fundado por el joven físico ruso Piotr Kapitsa (1894-1984), estudiante de Rutherford. Con los años, Kapitsa se convertiría en una de las personas más cercanas a Dirac, quizá, uno de los pocos amigos que tuvo.

El profesor Fowler no era muy apreciado en Cambridge como supervisor, ya que siempre se encontraba viajando y sus estudian-

tes se quejaban de lo difícil que resultaba poder trabajar con él. Esto no fue en absoluto un problema para Dirac, quien estaba acostumbrado a trabajar siempre en solitario. De hecho, Dirac apreció desde el primer momento poder trabajar a su aire en los problemas que se le planteaban. Muy de vez en cuando discutía con Fowler sus progresos; en otras ocasiones, simplemente le informaba de que había finalizado el trabajo en cuestión.

En cualquier caso, bajo la supervisión de Fowler, Dirac comenzó a adentrarse en la nueva teoría cuántica sobre la cual solo tenía conocimientos muy superficiales. Estudió los modelos atómicos desarrollados algunos años antes por Bohr y Sommerfeld. Al mismo tiempo, siguió profundizando en sus conocimientos de matemáticas a través de *Dinámica analítica*, texto de Edmund T. Whittaker (1873-1956) que se convirtió en una referencia básica para él. Durante estos primeros años en Cambridge, también asistió a los cursos impartidos por Eddington sobre relatividad general y cálculo tensorial, así como a los de Cunningham sobre electromagnetismo y relatividad especial. Aunque el tema básico de sus estudios era la teoría cuántica, seguía fascinado con la relatividad.

El estimulante ambiente de Cambridge y su participación en algunas actividades hicieron de Dirac una persona algo menos tímida e introvertida, aunque siguió teniendo un carácter muy reservado y manteniendo escaso contacto con otros estudiantes. Uno de sus compañeros en Cambridge, Thomas, dijo sobre él:

> Era un hombre de pocas palabras. Si le preguntabas algo, podría decir... «Oh, es muy difícil». Una semana después aparecía con la respuesta completamente elaborada.

La vida de Dirac se reducía al trabajo y el estudio, pasando la mayor parte del tiempo, de lunes a sábado, en la biblioteca. Los domingos los dedicaba a dar largos paseos por el campo, siempre solo, para, según sus propias palabras, renovarse y volver a estar preparado el lunes por la mañana para una nueva semana de estudio. En realidad, algunas de sus ideas más brillantes surgieron durante estas caminatas dominicales.

El esfuerzo de Dirac comenzó a dar frutos muy pronto. A los seis meses de su llegada a Cambridge publicó su primer trabajo en la revista *Proceedings of the Cambridge Phylosophical Society*. En los dos años siguientes publicó seis artículos más sobre temas diversos.

> «Elegía un problema general que contuviese la física expresada en forma no relativista, e intentaba transcribirlo siguiendo los principios de la relatividad. Era como un juego. En ocasiones, el resultado parecía suficientemente interesante para publicarlo.»
>
> — Paul Dirac.

Aunque el impacto internacional de estos trabajos fue bastante escaso, el nombre de Dirac comenzó a ser conocido en el ámbito de la reducida comunidad de físicos teóricos británicos. También desarrolló durante estos años un estilo y una forma de trabajo que mantuvo durante el resto de su vida. Sus publicaciones, la mayor parte de ellas elaboradas en solitario y firmadas únicamente por él, se caracterizan por un estilo muy conciso y directo, donde los aspectos esenciales son la claridad conceptual, la precisión técnica y la presentación lógica. Dirac comentó en alguna ocasión que solo empezaba a escribir una vez que tuviese en su mente un esquema general y completo de todo el trabajo.

Esta forma de trabajar, muy distinta a la de otros grandes científicos de la época, explica que apenas hiciese correcciones a sus escritos. El físico ruso Ígor Tam (1895-1971), uno de los colegas más cercanos a Dirac, comentó en cierta ocasión la siguiente conversación que tuvo lugar cuando Bohr leyó las pruebas de uno de los escritos de Dirac. El físico danés le preguntó a Dirac: «¿Por qué solo has corregido unos pocos errores y no has añadido nada nuevo al texto? Ha pasado ya mucho tiempo desde que lo escribiste. ¿Es que no has tenido nuevas ideas desde entonces?», a lo que Dirac respondió: «Mi madre solía decir: primero piensa, después escribe».

En estos dos primeros años en Cambridge, Dirac se convirtió en un prometedor científico, demostrando su capacidad para

resolver problemas físicos de forma brillante. Por otra parte, la teoría cuántica se encontraba en una difícil situación. El modelo de Bohr y Sommerfeld solo proporcionaba resultados consistentes para el átomo de hidrógeno, siendo incapaz de explicar los numerosos datos experimentales y las medidas espectroscópicas que se estaban obteniendo en aquellos momentos. Al mismo tiempo, seguía persistiendo la aparente incompatibilidad entre el comportamiento corpuscular de la luz, necesario para explicar el efecto fotoeléctrico, y el ondulatorio, que permitía describir los fenómenos de interferencia. ¿Cómo aunar ambos comportamientos? La revolucionaria explicación la proporcionó en 1924 el físico francés Louis de Broglie (1892-1987):

> Al igual que los fotones presentan propiedades ondulatorias y corpusculares, quizá toda forma de materia presenta ambas características.

Esta propiedad se conoce como «dualidad onda-corpúsculo» y establece que ambos comportamientos no son incompatibles, sino complementarios. La hipótesis de Louis de Broglie implica que partículas tales como los electrones deben presentar ambos tipos de efectos, corpusculares y ondulatorios. El espectro de interferencia, considerado como efecto claramente ondulatorio, también debe presentarse con electrones. Hubieron de transcurrir algunos años para que los hechos experimentales así lo mostrasen. La teoría cuántica, y la física en general, estaban a punto de experimentar la mayor revolución nunca vista, con implicaciones filosóficas entonces difíciles de aceptar.

El año 1925 fue muy especial para Dirac. Fue el año en el que surgió la nueva teoría cuántica y Dirac comenzó a aplicar todo su genio creativo y enorme poder de concentración a problemas fundamentales. Al mismo tiempo, fue el año en el que se produjo la mayor tragedia en la vida familiar de Dirac, el suicidio de su hermano.

CAPÍTULO 2

La mecánica cuántica

La mecánica cuántica, con sus extraños conceptos, tan alejados de la física clásica, empezó a construirse a partir de 1925 como una teoría perfectamente coherente y capaz de explicar los más variados fenómenos del mundo atómico. Dirac, junto a otros, fue uno de los artífices de esta construcción. Siempre con una mirada distinta y original, intentó dar una sólida base matemática a la teoría.

En mayo de 1925 Niels Bohr visitó Cambridge e impartió varios seminarios sobre los problemas de la teoría cuántica. El científico danés era entonces, sin duda alguna, la figura más importante en el ámbito de la física cuántica; una fuente inagotable de ideas e inspiración para todos los jóvenes investigadores que deseaban formarse en ese campo. Bohr habló sobre los problemas que aquejaban a la teoría cuántica, y su impotencia para resolverlos. Comentó la profunda insatisfacción que le producía el hecho de que en determinadas ocasiones hubiese de considerarse la luz como constituida por partículas, y en otras, por el contrario, como un fenómeno puramente ondulatorio. Bohr estaba convencido de que se necesitaba un nuevo enfoque, radicalmente distinto, y que este solo podía venir de mentes jóvenes y brillantes.

Entre los asistentes a los seminarios de Bohr estuvo Dirac, quien se sintió impresionado por la personalidad del físico danés y por la fuerza y seguridad que transmitía en sus razonamientos; era un torbellino de ideas que resultaban difíciles de digerir. Sin embargo, Dirac también se mostró bastante crítico con la forma de hacer física de Bohr. Nunca acabó de agradarle su principio de correspondencia al no formularse matemáticamente de modo claro. También mostró ciertas reticencias ante las argumentaciones de Bohr, al considerar que estaban excesivamente centradas en razonamientos de tipo filosófico, sin una sólida base matemática.

Dos meses después, a finales de julio de 1925, Werner Heisenberg, un joven físico alemán solo ocho meses mayor que Dirac, visitó Cambridge, donde impartió un seminario sobre espectroscopía atómica dentro del esquema general de la teoría cuántica conocida hasta ese momento (la teoría de Bohr-Sommerfeld). Nadie sabía en Cambridge que Heisenberg había desarrollado una nueva formulación de la teoría cuántica. El trabajo aún no se había publicado, y el físico alemán no hizo mención alguna al mismo, aunque se lo comunicó en una conversación privada a Fowler, quien le pidió que le enviase una copia tan pronto como se publicase. El texto llegó a las manos de Fowler a finales de agosto, quien se lo pasó inmediatamente a Dirac con una nota escrita: «¿Qué opinas de esto? Espero tus comentarios».

«Aunque Bohr me impresionó mucho, todos sus argumentos eran de tipo cualitativo. Lo que yo deseaba eran argumentos que pudiesen expresarse en términos de ecuaciones, y el trabajo de Bohr raras veces se formulaba de este modo.»

— Paul Dirac.

A partir de ese momento, la física dio un vuelco espectacular, al igual que la propia vida científica de Dirac, ya que por fin pudo dedicar toda su atención a problemas «fundamentales». En ese momento empezó una verdadera competición entre las mentes jóvenes más brillantes de la física para construir y asentar una nueva visión del mundo natural, una visión que explicase el comportamiento del mundo a escala microscópica, escala en la cual la intuición dejó de ser buena consejera. La competencia entre los grupos e investigadores era tal que los mismos resultados se obtenían de forma completamente independiente con una diferencia de meses o semanas.

Entre 1925 y 1927 surgieron tres formulaciones aparentemente diferentes de la nueva teoría cuántica, elaboradas en tres centros distintos: en Gotinga (Alemania), Heisenberg, Born y Jordan desarrollaron la denominada «mecánica matricial»; en Zúrich (Suiza), Schrödinger creó la «mecánica ondulatoria», y en Cam-

bridge (Inglaterra), Dirac desarrolló su propia visión de la nueva teoría. A estos cinco físicos, junto con Pauli, se les suele considerar como los fundadores de la mecánica cuántica. Realmente, fueron muchos más los que trabajaron y contribuyeron al desarrollo de la nueva teoría, pero los seis mencionados fueron los primeros en poner los cimientos de todo el edificio.

HEISENBERG: EL NACIMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Dirac no apreció en un primer momento la importancia del trabajo de Heisenberg. Por el contrario, le pareció excesivamente complicado y algo artificial. Solo tras leerlo con más detalle se dio cuenta del cambio revolucionario que estaba proponiendo el físico alemán. Dirac comenzó a estudiar en profundidad el trabajo de Heisenberg, intentando no solo comprenderlo, sino también mejorarlo y superarlo.

De hecho, la nueva teoría desarrollada por Heisenberg no era consistente con el principio de relatividad; por consiguiente, el primer objetivo de Dirac fue extender la nueva teoría, incorporando la relatividad en su seno. Sin embargo, el objetivo era demasiado ambicioso en aquel momento, incluso para el propio Dirac. Poco después surgió en su mente la idea fundamental que le permitió reformular la teoría de Heisenberg, idea directamente relacionada con uno de los aspectos que el propio físico alemán consideraba más cuestionable de su propia formulación: la no conmutatividad del producto.

¿En qué consistía la nueva teoría desarrollada por Heisenberg, y por qué se consideró desde un principio revolucionaria? La respuesta estaba escrita implícitamente en la propia introducción del trabajo del físico alemán:

> [Se trata de] establecer una base para la mecánica cuántica, basándose exclusivamente en relaciones entre cantidades que en principio sean observables.

HEISENBERG Y EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE



Werner Heisenberg (1901-1976) desarrolló en 1925 el trabajo seminal que marcó el nacimiento de la mecánica cuántica. Posteriormente, en colaboración con Max Born y Pascual Jordan, elaboró la denominada mecánica cuántica matricial. En 1927 Heisenberg introdujo el principio de incertidumbre que se expresa en la forma:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}.$$

En la teoría cuántica, este principio implica la existencia de una limitación fundamental en la precisión con la cual pares de variables —tales como la posición y el momento— pueden ser determinadas. El principio de incertidumbre, que dio origen a la denominada «interpretación de Copenhague» de la teoría cuántica, es uno de los principios fundamentales de la física moderna. En él se halla implícito cómo explicar la interacción entre partículas. El principio de Heisenberg no significa una limitación experimental que pudiera ser debida a los errores inherentes en toda medida; al contrario, es una consecuencia esencial que surge de la propia teoría cuántica. Incluso en el caso de un experimento ideal, el principio de incertidumbre seguiría persistiendo. Heisenberg recibió el premio Nobel en 1932 por «la creación de la mecánica cuántica». El físico alemán realizó trabajos sobre la teoría cuántica de la radiación y fue el primero en introducir el concepto de «isospín» en el contexto de la interacción nuclear. A pesar de los problemas que tuvo en la época del nazismo, decidió seguir en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial, viéndose obligado a participar en el desarrollo del programa nuclear alemán. Esta fue la época más controvertida de su vida. Durante los años siguientes, su mayor esfuerzo se centró en impulsar la ciencia en Alemania con continuas conferencias, libros, memorias. Al igual que había sucedido con Einstein, y sucedería después con otros físicos, los últimos años los dedicó a intentar encontrar una formulación unificada de las interacciones fundamentales.

En la teoría clásica, la trayectoria de una partícula es un concepto perfectamente definido que, además, se puede determinar. La propia imagen del átomo de Bohr consiste en electro-

nes moviéndose en trayectorias definidas alrededor del núcleo: las órbitas electrónicas. La propuesta de Heisenberg suponía una modificación radical de la propuesta de Bohr. La posición, la velocidad y la trayectoria no son magnitudes que puedan medirse directamente y, por tanto, deben reemplazarse por otras que tengan una interpretación cuántica más satisfactoria, tales como los niveles de energía y amplitudes de transición. Con esta idea fundamental, y considerando una situación especialmente simple, la de un oscilador armónico unidimensional (como un péndulo o un muelle oscilando alrededor de su posición de equilibrio), Heisenberg demostró que la descripción de propiedades dinámicas, tales como la posición o la velocidad de una partícula, requería la introducción de operadores que dependían de dos números enteros (números cuánticos) relacionados con la transición entre dos estados cuánticos definidos.

Esta dependencia en dos índices significaba que las magnitudes previas venían descritas como un tablero cuadrado de números con filas y columnas; además, ello trajo consigo una propiedad ciertamente extraña: el producto no satisfacía la propiedad conmutativa. En otras palabras, el resultado final dependía del orden de los operadores en el producto. En un principio, Heisenberg consideró este resultado como un posible fallo o error de la teoría que tendría que ser resuelto. Sin embargo, fue lo suficientemente atrevido para enviar su trabajo a su director, Max Born, quien decidió publicarlo inmediatamente.

DIRAC ENTRA EN ESCENA

El punto más débil de la nueva teoría según el propio Heisenberg fue considerado por Dirac como la idea más importante. Dirac había estudiado en detalle la mecánica clásica con el formalismo de Hamilton y conocía perfectamente la existencia de variables y magnitudes que no cumplían la ley conmutativa. Ahora bien, ¿existía alguna analogía entre las nuevas magnitudes cuánticas de Heisenberg y las variables de la teoría clásica? Parece ser que la

respuesta a esta cuestión surgió de repente en la mente de Dirac, cuando pensó en los denominados «corchetes de Poisson». Dirac expresó claramente cómo llegó a establecer tal relación:

> Fue durante uno de mis paseos dominicales por el campo en octubre de 1925. La combinación de variables cuánticas $xy - yx$ estaba siempre en mi mente, y de pronto recordé una construcción denominada «corchetes de Poisson», que se usaba con cierta frecuencia en la mecánica clásica. Al regresar a mi habitación revisé todas mis notas y los libros que tenía pero no pude salir de dudas. Apenas pude dormir en toda la noche, y a la mañana siguiente, a primera hora, me dirigí a la biblioteca. Allí encontré lo que buscaba en el texto de Whittaker, *Dinámica analítica*, que tanto había estudiado en el pasado.

Tras unas semanas de intenso estudio, Dirac encontró finalmente la relación que buscaba:

$$xy - yx = \frac{ih}{2\pi}[x, y].$$

Esta expresión relacionaba directamente las magnitudes u operadores cuánticos de Heisenberg con las variables clásicas introducidas a través de los corchetes de Poisson, $[x, y]$. La relación venía expresada a través de la constante de Planck h, el factor 2π y la unidad imaginaria $i = \sqrt{-1}$. Se denomina «constante de Planck reducida» a la magnitud

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}.$$

Esta notación fue introducida por Dirac en 1930.

A pesar de la reticencia que Dirac había mostrado sobre el principio de correspondencia de Bohr, aquí surgía dicho principio como motor básico de la teoría. La correspondencia entre las variables cuánticas y las clásicas, y la formulación de Hamilton de la mecánica clásica, llevaron rápidamente a Dirac a su nueva teoría del mundo cuántico. Todo cobraba sentido, y resultados y principios fundamentales —como la conservación de la energía y las frecuencias de Bohr— se explicaban de forma natural. Dirac

LOS CORCHETES DE POISSON



Los corchetes de Poisson fueron introducidos en 1809 por el físico y matemático francés Siméon Denis Poisson (1781-1840). Se trata de un concepto de gran utilidad en mecánica analítica, puesto que a partir de él pueden generarse las ecuaciones básicas del movimiento. La definición general es como sigue. Consideremos dos funciones arbitrarias, F y G, dependientes de las coordenadas y momentos generalizados: q_i, p_i; el corchete de Poisson se define en la forma:

$$[F,G]=\sum_j\left(\frac{\partial F}{\partial q_j}\frac{\partial G}{\partial p_j}-\frac{\partial F}{\partial p_j}\frac{\partial G}{\partial q_j}\right).$$

Las relaciones entre las variables canónicas vienen dadas por: $[q_i,q_j]=[p_i,p_j]=0$; $[q_i,p_j]=\delta_{ij}$, donde δ_{ij} es la función delta de Kronecker, es decir, $\delta_{ij}=0$ para $i\neq j$ y $\delta_{ij}=1$ para $i=j$. En el caso particular en que se considere la función hamiltoniana $H(q_j,p_j,t)$, es decir, la función que determina la energía del sistema, los corchetes de Poisson permiten obtener las siguientes ecuaciones básicas del movimiento:

$$\frac{dq_j}{dt}=[q_j,H];\quad \frac{dp_j}{dt}=[p_j,H];$$

$$\frac{dF}{dt}=[F,H]+\frac{\partial F}{\partial t}.$$

La formulación con los corchetes de Poisson permite identificar las constantes del sistema, es decir, aquellas magnitudes que se conservan. Cualquier función cuyo corchete de Poisson con el hamiltoniano sea nulo corresponde a una constante del movimiento. Análogamente, el corchete de Poisson de cualquier constante de movimiento con la función hamiltoniana debe ser cero.

completó su trabajo en noviembre de 1925 con el sugerente título de «Las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica» y se lo envió a Fowler, quien se percató de forma inmediata de la importancia y profundidad del trabajo de su estudiante. En el breve plazo de tres semanas, el artículo fue publicado en la revista *Pro-*

ceedings of the Royal Society. En aquellos momentos Dirac era un gran desconocido en la comunidad científica internacional; de ahí el revuelo que causó su trabajo entre los principales físicos cuánticos de la época. Born expresó su estupor por el «trabajo admirable» de un joven desconocido. Heisenberg, nada más recibir el manuscrito, envió una carta a Dirac felicitándole efusivamente por su extraordinario trabajo.

Era indudable que Dirac había dado un gran paso en su carrera científica, situándose en la vanguardia de la nueva teoría cuántica y entrando a formar parte del selecto grupo de sus fundadores. En aquellos años, la competición entre los físicos por ser los primeros en formular resultados básicos de la nueva teoría fue enorme, lo que trajo consigo una gran frustración para algunos de ellos. Así, se entiende el exquisito cuidado que mostró Heisenberg en su carta a Dirac tras felicitarle por su trabajo:

> Espero que no se sienta deprimido al saber que una parte importante de su reciente trabajo ha sido ya encontrada aquí hace algún tiempo y publicada recientemente por Born y Jordan. Esto no quita ningún mérito a su trabajo, cuya formulación es, en algún sentido, superior a la conseguida aquí.

Es cierto que Born, Jordan y Heisenberg desarrollaron lo que se denominó a partir de entonces «formalismo matricial» de la mecánica cuántica. En esos trabajos, completados algún tiempo antes que el de Dirac, obtuvieron resultados análogos a los de Dirac aunque sin hacer uso de los corchetes de Poisson.

A pesar de saber que no fue el primero en encontrar las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica (no sería la única vez que se diera tal situación), Dirac no sintió ninguna frustración. Al contrario, le sirvió para reafirmarse en su convicción de que su teoría era correcta y apropiada, quizá incluso superior en algunos aspectos a la formulación desarrollada por sus colegas alemanes. Siguiendo la sugerencia del físico americano John H. van Vleck («estoy deseando ver si alguna de las teorías desarrolladas puede reproducir los niveles energéticos del viejo modelo de Bohr para el átomo de hidrógeno»), la siguiente contribución de Dirac fue

MAX BORN Y PASCUAL JORDAN



Max Born.

Born y Jordan fueron los creadores, junto a Heisenberg, del esquema matricial de la mecánica cuántica. Max Born (1882-1970) se formó en distintos centros (Cambridge, Berlín, Fránkfurt), colaborando con los grandes físicos y matemáticos de la época: Thomson, Larmor, Minkowski, Planck, Stern. En 1921 fue nombrado profesor de Física Teórica en la Universidad de Gotinga (Alemania), donde permaneció los doce años siguientes. Este período corresponde a su máxima creatividad científica, cuando convirtió a la Universidad de Gotinga en el principal centro de investigación de la teoría cuántica. En aquella época fueron estudiantes o ayudantes suyos Heisenberg, Pauli, Jordan, Oppenheimer, Fermi, Teller, Wigner, Weisskopf. Siete de sus ayudantes llegarían a conseguir el premio Nobel. Pascual Jordan (1902-1980), por su parte, comenzó sus estudios universitarios en la Universidad Técnica de Hanóver, pero se trasladó al poco tiempo, en 1923, a Gotinga, donde fue ayudante primero del matemático Richard Courant y luego de Born, con quien realizó la tesis doctoral.

Una base matemática para la mecánica cuántica

Tras el pionero trabajo de Heisenberg en 1925, Born y Jordan (y posteriormente en colaboración con el propio Heisenberg) desarrollaron el formalismo general de la mecánica cuántica con el uso del cálculo matricial. En 1926 Born introdujo la interpretación probabilística de la función de onda, proporcionando significado físico a la misma. Este resultado, que dio origen a continuas discusiones sobre la fundamentación de la mecánica cuántica, constituye un aspecto esencial de la denominada «interpretación de Copenhague». En 1933 Born emigró a Gran Bretaña, donde fue profesor en la Universidad de Edimburgo desde 1936. Se le concedió el premio Nobel de Física en 1954. Por su parte, Jordan realizó trabajos proporcionando una consistencia matemática sólida a la mecánica cuántica e introdujo, junto a Dirac, las ideas pioneras en el desarrollo de la teoría cuántica de campos. En 1933 se alistó en el partido nazi, lo cual parece justificar que no se le concediese el premio Nobel. Durante sus últimos años fue profesor en la Universidad de Hamburgo, dedicando gran parte de su actividad a estudios de geología y biología.

precisamente comprobar que su modelo era capaz de reproducir dichos niveles energéticos. Un resultado similar había sido obtenido unos meses antes por Pauli.

EL ÁLGEBRA DE NÚMEROS-Q

Dirac desarrolló su formulación de la mecánica cuántica de forma independiente a la de sus colegas en Gotinga, e introdujo la denominada «notación de números-q» para referirse a las variables cuánticas. Estableció así una distinción clara entre números-q, donde la letra «q» se refiere a *quantum* (cuántico) o *queer* (raro, extraño), y los números-c, donde la «c» indica *classics* (clásico) o *commuting* (conmutativo). De esta forma expresaba claramente la diferenciación entre el mundo cuántico y el clásico. Aunque durante algún tiempo Dirac estuvo convencido de que su esquema de la teoría cuántica era superior a la mecánica matricial de Heisenberg, Born y Jordan, pronto comprobó que ambas formulaciones eran equivalentes:

> Necesité algún tiempo para convencerme de que mis números-q no eran en realidad más generales que las matrices y, de hecho, presentaban las mismas limitaciones que se podían probar matemáticamente en el caso de las matrices.

En el verano de 1926 Dirac elaboró una nueva versión de su teoría cuántica, denominada «álgebra de números-q». Este trabajo, presentado como una teoría puramente matemática, sin referencia alguna a problemas específicos de física, tuvo un impacto escaso en la comunidad física. Sólo algunos físicos especialmente interesados en los aspectos matemáticos de la mecánica cuántica, como Jordan, mostraron algún interés. Jordan lo expresó del siguiente modo: «Encuentro la publicación de Dirac muy interesante; para mí, las matemáticas son tan interesantes como la propia física». Dirac introdujo en su trabajo la definición general de diferenciación de variables cuánticas (números-q), y a partir

de ella, obtuvo las relaciones básicas de conmutación entre los operadores de posición (q), momento (p) y momento angular orbital (L), relaciones que previamente habían sido obtenidas en la formulación matricial de Born, Jordan y Heisenberg. Estos resultados constituyen hoy día el punto de partida de cualquier texto de mecánica cuántica.

El álgebra de números-q surgió así como una formulación alternativa a la mecánica matricial de Born, Jordan y Heisenberg. Desde la aparición del primer trabajo de Heisenberg, Dirac se centró, casi de forma exclusiva, en el desarrollo de su esquema demostrando que a partir del mismo podían explicarse los principales resultados del mundo subatómico. Sin embargo, su trabajo fue tan intenso que no pudo prestar atención a las nuevas formulaciones de la mecánica cuántica. Los trabajos de Dirac de este primer período fueron muy respetados entre la comunidad física, pero tuvieron menos influencia que los de Heisenberg, Born y Jordan. No resultaba fácil entender a Dirac, cuyo estilo y razonamientos llegaban a resultar crípticos para muchos de sus colegas. El físico John Slater expresó claramente su frustración con los escritos de Dirac:

> Existen dos tipos de físicos teóricos. El primero consiste en gente como yo, prosaica y pragmática, que siempre intentan escribir o hablar de la forma más comprensible posible. El segundo está formado por «magos» que mueven sus manos como si estuviesen sacando un conejo de la chistera (como Dirac), y que no se encuentran satisfechos a no ser que lleguen a revestir sus escritos y explicaciones con un marcado carácter místico.

A partir de la primavera de 1926 el máximo interés en la teoría cuántica se desplazó de forma inesperada a la Universidad de Zúrich. Allí, un desconocido físico, que hasta entonces no había tenido ninguna participación en la elaboración de la teoría cuántica, Erwin Schrödinger (1887-1961), desarrolló un nuevo esquema de la mecánica cuántica. Una descripción que resultó para la mayoría de los físicos de la época mucho más clara conceptualmente que el complicado lenguaje matricial y algebraico desarrollado hasta ese momento.

LA MECÁNICA ONDULATORIA DE SCHRÖDINGER

Se cree que la primera noticia que recibió Dirac sobre la nueva teoría de Schrödinger se produjo cuando Sommerfeld visitó Cambridge en marzo de 1926, el mismo mes en el que se publicó el primer trabajo de Schrödinger. Sin embargo, en aquellos momentos Dirac estaba demasiado ocupado con el desarrollo de su propio esquema de la teoría cuántica como para prestar especial atención a nuevos lenguajes. Además, no se sintió impresionado por la formulación ondulatoria de Schrödinger, que, de hecho, consideró en un primer momento una simple vuelta a la teoría, ya desfasada, de Louis de Broglie. Dirac lo expresó del siguiente modo:

LA ECUACIÓN DE SCHRÖDINGER



En la teoría de Schrödinger, el estado de un sistema cuántico viene definido por una función matemática compleja denominada función de ondas Ψ, que depende del tiempo y de todas las coordenadas que definen el sistema bajo estudio. Dicha función de ondas es la solución de una ecuación diferencial de primer orden en el tiempo, que se expresa en la forma:

$$i\hbar\frac{d\Psi(\vec{r},t)}{dt} = H(\vec{r},t)\Psi(\vec{r},t) =$$

$$= \left(-\frac{\hbar^2\nabla^2}{2M^2} + V(\vec{r},t)\right)\Psi(\vec{r},t).$$

El operador H es la función hamiltoniana, que incorpora toda la información sobre la energía total, cinética y potencial, del sistema. La energía cinética (debida al movimiento) está definida a través del término

$$\frac{\hbar^2\nabla^2}{2M^2},$$

Al principio sentí cierta hostilidad hacia la teoría de Schrödinger. ¿Por qué tendríamos que volver a un estado previo a Heisenberg, cuando no existía la mecánica cuántica? Realmente, me molestaba esta posibilidad de tener que volver atrás y quizá abandonar todo el progreso que se había conseguido con la nueva teoría cuántica. Definitivamente, sentía hostilidad hacia las ideas de Schrödinger, sentimiento que persistió durante algún tiempo.

De este modo, Dirac no hizo ninguna mención a la nueva formulación de Schrödinger en su tesis doctoral, presentada en mayo de 1926.

A pesar de las reticencias de Dirac, la mecánica ondulatoria tuvo un éxito espectacular, y una gran mayoría de los físicos de

donde M es la masa del sistema y ∇^2 el operador laplaciano:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Por último, el término $V(\vec{r},t)$ representa la energía potencial. En el caso en que el hamiltoniano no dependa del tiempo, la ecuación de Schrödinger puede resolverse dando lugar a los denominados «estados estacionarios.» La ecuación de Schrödinger independiente del tiempo permite determinar la función de onda dependiente de las variables espaciales:

$$H(\vec{r})\psi(\vec{r}) = \left(-\frac{\hbar^2\nabla^2}{2M^2} + V(\vec{r})\right)\psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r}).$$

En esta situación (estado estacionario), el operador hamiltoniano actuando sobre la función de ondas da lugar a la energía total del sistema. En otras palabras, la energía E es el valor propio (autovalor) de la función hamiltoniana. La ecuación de Schrödinger no es compatible con la teoría de la relatividad. Obsérvese que la forma en que se incorporan en la ecuación las variables espaciales y temporal es distinta. Mientras que el tiempo aparece como una derivada de primer orden, las coordenadas espaciales surgen en derivadas de segundo orden. Este aspecto también está en contradicción con el principio inherente en la teoría relativista: el tratamiento simétrico de las cuatro componentes, tres espaciales y la temporal, que dan lugar al denominado «cuadrivector espacio-tiempo».

la época estuvieron «encantados» de abandonar el complejo y oscuro lenguaje de operadores matriciales y números-q frente a la simplicidad de la ecuación diferencial de Schrödinger. Este, en una serie de trabajos publicados durante la primavera y el verano de 1926, introdujo los fundamentos de su nueva teoría, proporcionando una descripción de los niveles energéticos del átomo de hidrógeno. En el esquema de Schrödinger, toda la información sobre el sistema se hallaba contenida en la denominada «función de onda», función matemática compleja cuyo significado aún no estaba claro.

Por otra parte, el lenguaje de Schrödinger resultaba muy diferente al que habían desarrollado Heisenberg, Born y Jordan por una parte, y Dirac, por otra. Esta discrepancia en teorías que explicaban y reproducían los mismos fenómenos naturales era muy difícil de aceptar para Dirac, quien siempre había intentado encontrar una descripción consistente y unificada del mundo subatómico. La interpretación física de la función de onda fue proporcionada por Born durante el verano de 1926, y se conoce hoy día como «interpretación probabilística». En ella se establece que la «densidad de probabilidad de encontrar una partícula viene dada por el módulo al cuadrado de la función de onda». En cuanto a la relación entre ambas teorías, la mecánica ondulatoria y la matricial, el propio Schrödinger demostró la equivalencia matemática entre las mismas en su tercer trabajo. Parece que Pauli demostró tal equivalencia algún tiempo antes, aunque no publicó ningún trabajo al respecto.

DIRAC Y LA MECÁNICA ONDULATORIA

La demostración de la equivalencia matemática entre el lenguaje de ondas y el álgebra de matrices o números-q hizo que Dirac abandonase toda reticencia hacia la nueva formulación. Dirac mantuvo a partir de aquel momento una postura muy pragmática, y aceptó que la nueva mecánica ondulatoria resultaba considerablemente más fácil de usar para resolver determinados problemas.

Así, en muy poco tiempo, Dirac publicó un nuevo trabajo titulado: *Sobre la teoría de la mecánica cuántica*, en el que hacía uso por primera vez de la teoría ondulatoria aplicándola a sistemas de partículas idénticas.

¿Qué se entiende por partículas idénticas en el contexto de la teoría cuántica, y en qué consistió exactamente la nueva aportación de Dirac? Para responder a esta cuestión debemos regresar un momento al año anterior, a 1925, y formular una nueva pregunta: ¿por qué los elementos químicos pueden clasificarse en determinados grupos que muestran propiedades químicas similares? Pauli explicó que las propiedades químicas eran una consecuencia de la forma en la que los electrones se disponían en sus respectivas órbitas electrónicas. Cada electrón venía descrito por una serie de números cuánticos que caracterizaban la función de ondas. Estos números cuánticos definían la energía del electrón, su momento angular orbital y una nueva propiedad que hubo de introducirse para explicar los datos experimentales: el «espín» (cuestión descrita en detalle en el siguiente capítulo). Pauli enunció su principio de exclusión:

> Dos electrones no pueden ocupar el mismo estado cuántico, es decir, no pueden tener el mismo conjunto de números cuánticos.

Este principio permitía explicar por qué los electrones atómicos se iban disponiendo en diferentes órbitas electrónicas según se iban ocupando otras. De hecho, el principio de Pauli permite entender por qué la materia es tal como la conocemos.

Otra propiedad esencial del mundo cuántico es que las partículas idénticas son indistinguibles. En la física clásica la posición de una partícula y su estado de movimiento están perfectamente determinados, de modo que, aun teniendo varias partículas idénticas, se podría conocer en qué posición se encuentra cada una de ellas. Por el contrario, en el mundo cuántico la posición no está claramente definida, y por consiguiente, si tenemos dos electrones (llamémosles a, b) y dos estados cuánticos determinados (m, n), no podemos conocer en qué estado concreto se encuentra cada electrón. De hecho, la situación correspondiente al electrón

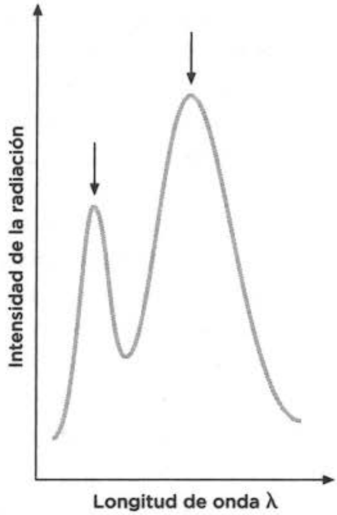
a en el estado m (lo denotamos como a_m) y el electrón b en el estado n (b_n) es igualmente probable a la combinación inversa: $a_n b_m$. Usando una terminología algo más técnica, ambas combinaciones representan el mismo estado cuántico y por tanto, deben ser proporcionales, siendo la constante de proporcionalidad +1 o −1. Nótese que si permutamos dos veces seguidas la posición de ambos electrones, la combinación resultante debe ser idéntica a la inicial.

Dirac concluyó que la descripción más general del estado cuántico de los dos electrones debía ser una combinación lineal de ambas posibilidades: $a_m b_n \pm a_n b_m$. Obsérvese que si se considera el signo + e intercambiamos los estados m y n o los electrones a y b, se obtiene exactamente el mismo resultado. Esta propiedad se denomina «combinación simétrica». Por el contrario, el signo − corresponde a una combinación antisimétrica, es decir, el intercambio de los estados o los electrones trae consigo un cambio de signo global.

El comportamiento de ambas soluciones es, por tanto, muy diferente, pero, ¿cuál de ellas es consistente con el principio de exclusión de Pauli? Dirac concluyó que la única respuesta posible correspondía a la combinación antisimétrica. En tal situación, si los dos electrones se situaban en el mismo estado, es decir, $m = n$, la combinación resultante es idénticamente nula, y ello significa que tal estado no puede existir.

Dirac generalizó su estudio a un gas de moléculas suponiendo, erróneamente, que su descripción era similar al caso de los electrones, es decir, con funciones de onda antisimétricas. Haciendo uso de métodos estadísticos obtuvo finalmente la distribución energética de las moléculas. También mostró que los cuantos de luz, los fotones, podían describirse a partir de combinaciones simétricas. Al contrario de los electrones, el principio de exclusión de Pauli no era aplicable a la radiación, es decir, los fotones manifestaban un comportamiento claramente gregario; tendían a ocupar todos el mismo estado. La descripción de este tipo de partículas como combinaciones simétricas condujo a Dirac a la denominada estadística de Bose-Einstein introducida unos años antes.

DIRAC Y EL EFECTO COMPTON



En 1916 Einstein introdujo el concepto de «cuantos» luminosos, llamados «fotones», con energía y momento determinados. El experimento que puso más claramente en evidencia la naturaleza corpuscular de la luz fue llevado a cabo en 1923-1924 por el físico estadounidense Arthur H. Compton (1892-1962). Este trabajo coincidió con la hipótesis sobre la naturaleza dual, onda-corpúsculo, de la radiación introducida por Louis de Broglie. Compton observó que al incidir una radiación de longitud de onda dada sobre un blanco de grafito, la radiación dispersada era emitida con dos longitudes de onda diferentes: una era idéntica a la correspondiente a la radiación incidente, mientras que la otra se encontraba desplazada respecto a la anterior por una cantidad que dependía del ángulo de dispersión (tal y como muestra el gráfico). Este resultado experimental estaba en contradicción con la teoría clásica de la radiación, según la cual la radiación dispersada no podía depender del ángulo de incidencia. Compton explicó la variación en la longitud de onda de la radiación dispersada considerando el proceso como una colisión elástica entre el fotón (partícula) incidente y el electrón del blanco de grafito.

El análisis de Dirac

Dirac conocía los experimentos de Compton y decidió aplicar su formulación de la mecánica cuántica a dicho proceso. No solo fue capaz de reproducir el cambio en la longitud de onda de la radiación dispersada, sino que también obtuvo la intensidad de dicha radiación, comprobando que su resultado era ligeramente diferente al proporcionado por Compton en 1923. Su trabajo, publicado a finales de abril de 1926, recibió una gran acogida en la comunidad física. Sin embargo, su estilo de escritura, demasiado conciso y con un lenguaje matemático difícil de seguir, convertía sus trabajos en mensajes casi indescifrables para muchos de sus colegas. Cuando Dirac comprobó que sus predicciones no coincidían con los datos de Compton, señaló que dicha discrepancia «sugería que la magnitud absoluta de los valores de Compton era aproximadamente un 25% demasiado pequeña». Al poco tiempo de publicar el trabajo, Compton escribió a Dirac mencionándole que las nuevas medidas realizadas en la Universidad de Chicago confirmaban completamente su teoría.

LA ESTADÍSTICA DE FERMI-DIRAC

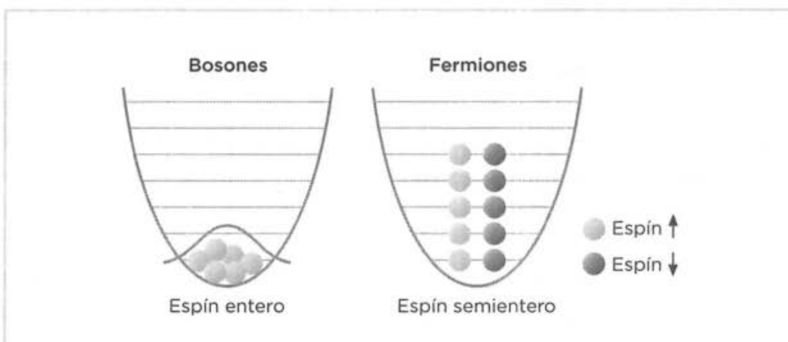
Dirac publicó su trabajo en agosto de 1926, poco tiempo después de que Heisenberg completase un estudio similar sobre el átomo de helio. Al poco tiempo de aparecer su publicación, Dirac recibió una carta del físico italiano Enrico Fermi en los siguientes términos:

> En su reciente trabajo ha desarrollado una teoría del gas ideal basándose en el principio de exclusión de Pauli. Quisiera llamar su atención sobre un trabajo similar que publiqué a comienzos de 1926.

La situación resultó algo embarazosa para Dirac, quien inmediatamente se disculpó ante Fermi, reconociendo que había visto su trabajo, pero sin prestarle especial atención en ese momento:

> Cuando leí el trabajo de Fermi no pude apreciar su importancia en ninguno de los problemas básicos de la mecánica cuántica en los que estaba interesado. Cuando escribí mi propio trabajo sobre las funciones de onda antisimétricas, simplemente había olvidado toda referencia al mismo.

Una vez más, otros físicos se adelantaron a Dirac en la resolución del problema. Sin embargo, como ya había sucedido en ocasiones anteriores, ello no supuso ninguna frustración para Dirac,



La figura ilustra el comportamiento de bosones (izquierda) y fermiones (derecha). Todos los bosones (espín entero) tienden a ocupar el estado de mínima energía. Los fermiones (espín semientero) están sometidos al principio de exclusión de Pauli y no pueden ocupar estados con los mismos números cuánticos.

cuyo trabajo recibió una gran acogida entre la comunidad científica. A partir de entonces, el análisis estadístico de partículas como los electrones comenzó a conocerse como «estadística de Fermi-Dirac». Años después, en 1947, el propio Dirac introdujo los nombres de «fermiones» y «bosones» para hacer referencia a las partículas que satisfacían las estadísticas de Fermi-Dirac y Bose-Einstein, respectivamente (véase la figura de la página anterior).

Aunque el trabajo de Dirac fue acogido con gran interés, muchos físicos lo consideraron extremadamente difícil de comprender, algo que ya había sucedido en ocasiones previas y que seguiría repitiéndose en el futuro. Schrödinger se lo comentó a Bohr con resignación, pero sin dejar de lado cierto sentido del humor:

> Encontré el trabajo de Dirac muy valioso, aunque aún hay muchas cuestiones que no entiendo. [...] Dirac tiene un método único y original de pensar, el cual —precisamente por dicha razón— le conducirá a los resultados más valiosos e inesperados, aunque sigan ocultos para el resto de nosotros. Dirac no tiene idea de lo difícil que resultan sus trabajos para los seres humanos normales.

PRIMER VIAJE: COPENHAGUE

En septiembre de 1926 Dirac decidió completar su formación científica realizando una estancia de un año en el centro donde había surgido la mecánica cuántica: la Universidad de Gotinga. Sin embargo, siguiendo el consejo de Fowler, decidió finalmente dividir su estancia entre Copenhague, donde estaría los cinco primeros meses, y Gotinga. En la capital danesa Dirac se encontró con los más brillantes físicos de la época: Bohr, Heisenberg, Klein, Ehrenfest, Pauli... Aunque Bohr no tenía ya un papel tan destacado en el desarrollo de la teoría cuántica, su personalidad seguía dominando el mundo de la física cuántica. Su instituto en Copenhague era en aquellos momentos un centro de referencia de la nueva teoría cuántica, donde, en un ambiente de gran familiaridad, sus visitantes mantenían continuas discusiones y cola-

boraciones. Esta era la forma de trabajar de Bohr, para quien las discusiones y argumentaciones nunca tenían fin, llevando a sus colegas y colaboradores a la extenuación, tal y como le sucedió a Schrödinger unas semanas antes de la llegada de Dirac. Es indudable que este nuevo ambiente, tan diferente al rígido sistema en Cambridge, tuvo alguna influencia en Dirac. Él mismo dijo algunos años después:

> Bohr parecía ser el pensador más profundo con el que jamás me encontré. [...] Durante aquel período realizamos grandes paseos juntos charlando sin parar, aunque debo reconocer que era Bohr quien hablaba todo el tiempo.

A pesar del ambiente tan dinámico de Copenhague, Dirac no modificó sus hábitos, trabajando en solitario y manteniéndose al margen de las continuas discusiones que tenían lugar en el instituto. Su rutina consistía en trabajar de lunes a sábado en la biblioteca y los domingos realizar sus habituales caminatas por el campo. Algunos testimonios de los estudiantes presentes en aquella época nos muestran claramente su trabajo y carácter:

> Dirac siempre nos pareció misterioso. Frecuentemente se sentaba solo en el rincón más apartado de la biblioteca, en la posición más incómoda posible, completamente absorto en sus pensamientos. [...] Podía estar todo el día en la misma posición, escribiendo sin parar un artículo completo, y sin levantar la vista del papel ni una sola vez.

Respecto a la posible colaboración de Dirac con otros colegas, en particular con el propio Bohr, desde el primer momento quedó claro que Dirac no estaba especialmente interesado en llevar a cabo el esfuerzo que requería cualquier trabajo en común. Aunque asistía a los seminarios y reuniones que se organizaban en el instituto, su participación siempre se reducía a ser un mero oyente. Las discusiones en aquellos meses sobre los problemas de fundamentación de la mecánica cuántica y el debate epistemológico consiguiente no eran de especial relevancia para Dirac, quien consideraba mucho más importante la formulación de la teoría







FOTOS SUPERIORES:
Retratos de Paul Dirac (izquierda) y Niels Bohr. Dirac coincidió con este último durante su estancia en Copenhague.

FOTO INFERIOR:
Paul Dirac (a la izquierda) retratado junto a los físicos Wolfgang Pauli (en el centro) y Rudolf Peierls en la Universidad de Birmingham.

a través de las matemáticas. Su forma de hacer física no podía ser más distinta a la de Bohr. Para Dirac, Bohr estaba excesivamente preocupado por cuestiones que no podían formularse de una forma clara y precisa, y esto le conducía a dar siempre vueltas y vueltas sobre el mismo tema, sin llegar a ninguna conclusión determinada. Dirac consideraba que la formulación matemática era la única forma posible para definir con precisión los conceptos físicos.

Existe una anécdota famosa donde se muestra la absoluta disparidad entre los caracteres de Bohr y Dirac. La anécdota también refleja, por si hubiese alguna duda, que toda colaboración científica entre ambos era un sueño imposible. Una vez que se completaba un trabajo, Bohr tenía la práctica habitual de dictárselo a sus jóvenes colaboradores. Este ejercicio se convertía en una verdadera pesadilla, puesto que Bohr cambiaba continuamente de argumentaciones, sin estar nunca satisfecho de la forma en que expresaba el contenido. En cierta ocasión, al poco tiempo de la llegada de Dirac a Copenhague, este tuvo el «honor» de ser llamado a la presencia del gran Bohr para colaborar en el nuevo trabajo que estaba desarrollando. A los pocos minutos de comenzar el dictado, Dirac decidió que tenía cosas más interesantes que hacer que estar todo el tiempo reescribiendo una frase hasta que Bohr decidiese que la prosa era suficientemente clara. En estas circunstancias, el único comentario, breve y preciso, de Dirac fue: «En la escuela siempre me enseñaron que no debería comenzar una frase hasta que no supiese cómo terminarla». Aquel debió de ser el modo de Dirac de informar a Bohr que debía buscarse un nuevo colaborador.

LA TEORÍA DE LA TRANSFORMACIÓN

La llegada de Dirac a Copenhague coincidió con un período de continuas discusiones sobre la interpretación probabilística de la función de onda de Schrödinger. Un mes antes, Born había desarrollado dicha interpretación haciendo uso del módulo al

cuadrado de la función de onda. Sin embargo, ni el mismo Schrödinger admitía dicha interpretación, la cual también era rechazada por otros físicos insignes como Einstein. Por el contrario, la interpretación probabilística era aceptada plenamente por Bohr y la mayoría de sus colaboradores. Aunque Schrödinger había demostrado la equivalencia matemática entre el esquema ondulatorio y el matricial, la mayoría de los físicos pensaban que era necesario desarrollar un esquema general que aunase las distintas formulaciones de la mecánica cuántica, incorporando la interpretación probabilística de la función de onda y su relación con los operadores matriciales. Este esquema fue elaborado de forma independiente por Dirac y Jordan. En el caso de Dirac, su estudio fue publicado en enero de 1927 con el título de *La interpretación física de la dinámica cuántica*. Este trabajo está considerado como uno de los más importantes y completos de Dirac. En el mismo se presentaba la formulación matemática más rigurosa y general de la mecánica cuántica.

Dirac la denominó «teoría de la transformación», y siempre se sintió especialmente orgulloso de ella, una teoría que, en sus propias palabras, fue construyendo paso a paso sirviéndose exclusivamente del razonamiento lógico. Así, afirmó que «este trabajo me proporcionó más placer que cualquier otro anterior o posterior». Sus colegas reconocieron el carácter extraordinario del mismo y se sintieron impresionados por su generalidad y rigor lógico. Lo calificaron como «extraordinario avance». Sin embargo, el estilo de Dirac no había cambiado, y físicos de la talla de Oskar Klein no pudieron evitar comentar:

> Nos llevó algún tiempo entender sus argumentos, porque en sus seminarios, a pesar de escribir cuidadosamente en la pizarra todas sus fórmulas y dibujar sus gráficas, apenas comentaba nada de ellas. Así que resultaba realmente complicado seguirle.

La mecánica matricial o álgebra de números-q y la mecánica ondulatoria eran teorías muy distintas que describían los mismos fenómenos naturales. Era imprescindible encontrar una relación unívoca entre ellas, comprobando que ambos lenguajes eran com-

pletamente equivalentes. Dirac planteó su trabajo en los siguientes términos:

> Se presenta un esquema general en el que se formulan cuestiones que la teoría cuántica puede responder sin ambigüedad. Se muestra toda la información física que puede obtenerse de la dinámica cuántica y el método para llegar a tal fin.

Veamos brevemente algunos aspectos básicos de la nueva teoría de Dirac. En el contexto de la mecánica matricial de Heisenberg, Born y Jordan, el uso de transformaciones canónicas estaba bien establecido. Se denomina «transformación canónica» a toda transformación que preserva la relación fundamental de cuantización. Consideremos, por ejemplo, el caso de los dos operadores cuánticos relacionados con la posición (q) y momento (p), los cuales satisfacen $pq - qp = i\hbar I$, donde I es el operador matricial identidad. La transformación canónica consiste en determinar el operador de transformación que nos permita construir dos nuevas variables dinámicas cuánticas (P, Q), tales que sigan satisfaciendo la relación de cuantización $PQ - QP = i\hbar I$. La relación entre las variables originales y las nuevas se expresa en la forma:

$$P = TpT^{-1}, \quad Q = TqT^{-1},$$

donde T es el operador de transformación, y T^{-1}, su inverso, es decir, $TT^{-1} = T^{-1}T = I$. El uso de las transformaciones canónicas había demostrado tener un gran interés en el proceso de diagonalización del operador hamiltoniano, lo cual permitía determinar las energías de un sistema.

El objetivo básico de Dirac era determinar el significado «real» del operador de transformación y su relación con la función de onda de Schrödinger. Dirac concluyó que las funciones propias de la ecuación de ondas de Schrödinger correspondían simplemente a los operadores de transformación que permitían obtener la representación diagonal del hamiltoniano. De esta forma, Dirac englobaba en un solo marco general tanto el formalismo de operadores cuánticos de Heisenberg, Born y Jordan, con

sus reglas de cuantización, como la imagen de Schrödinger, con su ecuación diferencial de evolución y su función de onda. La teoría de la transformación incorpora así las propiedades y principios que Dirac consideraba esenciales en toda teoría cuántica. El físico construyó gran parte de su trabajo posterior tomando como punto de partida dichas propiedades.

> «La grandeza de una idea científica reside en su capacidad de estimular el pensamiento y abrir nuevas líneas de investigación.»
>
> — Paul Dirac.

Durante el desarrollo de su teoría de la transformación, Dirac introdujo una importante innovación formal que con el tiempo se ha convertido en una herramienta esencial en el desarrollo de la física moderna: la función δ. Es imposible entender el lenguaje actual de la física sin hacer uso de esta función. Todo texto actual sobre teoría cuántica incorpora apéndices especiales sobre la función de Dirac y sus propiedades esenciales, y la resolución de cualquier problema concreto en el mundo subatómico requiere manipulación y trabajo con la misma. En su artículo «La interpretación física de la dinámica cuántica» Dirac justificó la introducción de la función δ en los siguientes términos:

> No se puede ir más allá en el desarrollo de la teoría de matrices con rangos continuos de filas y columnas a no ser que se introduzca una notación para aquella función de un número-c, denominado x, que sea igual a cero excepto cuando x es muy pequeño, y cuya integral a lo largo del rango de valores que contiene el punto $x = 0$ es igual a la unidad.

Dirac introdujo la función δ en la forma:

$$\delta(x)=0 \text{ si } x\neq 0; \qquad \int_{-\infty}^{+\infty}\delta(x)\,dx=1,$$

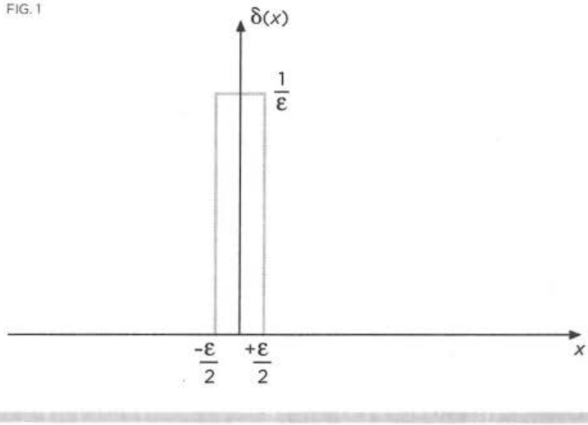
para a continuación afirmar:

Por supuesto, $\delta(x)$ no es estrictamente una función propia de x, pero puede considerarse como el límite de una secuencia de funciones. En todo caso, uno puede usar $\delta(x)$ como si fuese una función propia a efectos prácticos para resolver cualquier problema de la teoría cuántica sin obtener en ningún caso resultados erróneos.

LA FUNCIÓN δ DE DIRAC

Dirac no fue el primero en usar la función δ, aunque sí generalizó su uso, convirtiéndola en una herramienta esencial en el desarrollo de la teoría cuántica. La función $\delta(x)$ no es una función matemática en el sentido habitual, es decir, no es una función que posea valores definidos en cada uno de los puntos de su dominio (la región donde está definida). Por el contrario, toma el valor cero en todo el rango de valores de x, excepto en $x=0$, donde se hace infinita. Dirac la denominó función «impropia» para justificar su diferencia con las funciones «usuales», señalando que su uso debía restringirse a ciertos tipos de problemas donde no surgiesen inconsistencias. En concreto, señaló que, aunque la función impropia $\delta(x)$ no tenga un valor bien definido, cuando aparece como parte de un integrando el resultado de la integral presenta un valor perfectamente definido. El análisis riguroso de la función $\delta(x)$ se enmarca dentro de la teoría general de distribuciones desarrollada en 1945 por el matemático Laurent Schwartz (1915-2002). Puede ilustrarse el comportamiento de la función $\delta(x)$ a través de la función representada en la figura 1, en la cual se observa que es cero en todo el rango de valores de x excepto en un pequeño dominio de extensión ε alrededor del origen. Dentro de este dominio la altura

FIG. 1



Una vez más, el trabajo de Dirac resultó admirable para sus colegas, pero no fue el único en desarrollarlo. Jordan estudió el mismo problema elaborando su propia teoría de las transformaciones. Aunque el procedimiento seguido por ambos físicos fue muy diferente, las conclusiones eran completamente equivalen-

de la función viene dada por $1/\varepsilon$. Por consiguiente, el área subtendida por la función es 1. La función $\delta(x)$ surge como el límite de la función representada en la figura cuando se hace tender el valor del parámetro ε a 0 ($\varepsilon \to 0$). Otras muchas funciones permiten generar la función $\delta(x)$. Por ejemplo, el caso de la conocida función gaussiana que se representa gráficamente en la figura 2. La anchura de la misma viene determinada por el coeficiente σ. Al reducir el valor de este parámetro, la función se hace cada vez más estrecha, aumentando considerablemente su valor máximo. En el límite en que la anchura se aproxima a cero, el valor máximo tiende a infinito. Se expresa matemáticamente del siguiente modo:

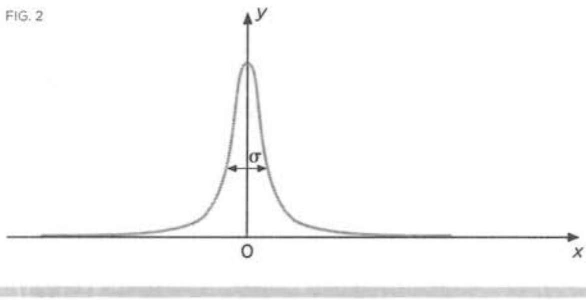
$$\delta(x) = \lim_{\sigma \to 0} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}.$$

La propiedad más importante de la función δ de Dirac se expresa a través del siguiente resultado:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\delta(x-a) = f(a),$$

donde $f(x)$ es cualquier función continua y a cualquier número real. Así pues, el proceso de multiplicar una función de x por $\delta(x-a)$ e integrar sobre todo x se reduce a evaluar la función f en el punto $x=a$. El rango de integración no necesita extenderse desde $-\infty$ a $+\infty$, sino en cualquier dominio que contenga al punto crítico en el cual la función δ no se anula. La función δ de Dirac constituye hoy día una herramienta esencial en cualquier campo de la física.

FIG. 2



tes. Dos meses después de la publicación de los trabajos de Dirac y Jordan, Heisenberg introdujo su famoso principio de incertidumbre, cuya formulación matemática estaba basada en gran medida en la teoría de Dirac-Jordan. De hecho, Dirac llegó a escribir en su trabajo una idea próxima al principio de incertidumbre de Heisenberg:

> No puede contestarse ninguna cuestión en la teoría cuántica que haga referencia a valores numéricos de ambas variables cuánticas, p y q (posición y momento iniciales).

GOTINGA Y EL AMANECER DE LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

A principios de febrero de 1927 Dirac se desplazó a Gotinga, donde permaneció los cinco meses siguientes. Allí coincidió con los fundadores de la mecánica matricial: Born, Jordan y Heisenberg. La Universidad de Gotinga era uno de los centros de investigación más prestigiosos del mundo, no solo como cuna de nacimiento de la nueva teoría cuántica, sino por su tradición de excelencia en el campo de las matemáticas. Profesores de Gotinga habían sido Gauss, Riemann, Dirichlet, Klein... En 1927 David Hilbert (1862-1943), la figura más influyente y universal en las matemáticas, también se encontraba en Gotinga. Algunos de sus alumnos más brillantes, como John von Neumann (1903-1957) y Hermann Weyl (1885-1955), tendrían un papel muy destacado en la formulación de la teoría cuántica.

Dirac aprovechó su estancia en Gotinga para afianzar y adquirir nuevos conocimientos en diversas ramas de las matemáticas. Por esta razón asistió al curso que Weyl impartía sobre teoría de grupos. Esta constituía una rama de las matemáticas que se había desarrollado durante el siglo XIX, pero que, gracias al trabajo del propio Weyl y de Eugene P. Wigner (1902-1995), se había convertido en una parte importante de la física teórica. Durante los años siguientes, Weyl y Wigner harían amplio uso de las técnicas de la teoría de

grupos en el marco de la mecánica cuántica. A pesar de ello, Dirac no se sintió especialmente interesado por esta teoría que consideró «innecesaria» para la resolución de problemas físicos.

La intuición de Dirac no anduvo fina en este caso; la teoría de grupos se convertiría en piedra angular en el desarrollo de la física moderna. Dirac, sin embargo, apreció de forma muy especial el trabajo de Weyl. Cuando un periodista le preguntó años después: «Profesor Dirac, ¿alguna vez se ha encontrado con alguien a quien no pueda entender?», la respuesta fue: «Sí, Weyl». Quizá para algunos de los colegas de Dirac, que siempre se quejaron de la extrema dificultad en seguir sus argumentaciones y entender sus trabajos, fue toda una revelación, y también una gran tranquilidad, saber que existía alguien a quien Dirac no podía seguir en sus razonamientos.

Desde el punto de vista científico, la estancia de Dirac en Gotinga coincidió con la publicación de dos trabajos en los que desarrolló el fundamento de la teoría cuántica de la radiación. De hecho, se considera a Dirac el fundador de la electrodinámica cuántica. En el capítulo 4 se presentará una descripción detallada de los dos trabajos mencionados. Dirac fue el primer físico en desarrollar una teoría cuántica de la interacción radiación-materia. La recompensa fue grande, pero quizá aún mayor el desengaño.

REGRESO A CAMBRIDGE

A finales de junio de 1927 Dirac puso fin a su estancia en Gotinga. Durante su viaje de vuelta a Cambridge, pasó varios días en la Universidad de Leiden (Holanda) invitado por Paul Ehrenfest (1880-1933), con quien discutió sus últimos trabajos sobre la teoría de la radiación. Ehrenfest estaba obsesionado por entender completamente todos los aspectos emergentes de la nueva teoría cuántica. Era bien conocido que su presencia en los seminarios los convertía en verdaderos interrogatorios para el conferenciante. Su obsesión enfermiza le hacía caer en profundas depresiones cuando se veía incapaz de seguir el desarrollo de los nuevos descubrimien-

tos. Ehrenfest admiraba el trabajo de Dirac, que consideraba de gran originalidad pero muy difícil de entender:

> Hemos estado horas y horas estudiando unas pocas páginas de su trabajo, y aún existen puntos tan oscuros como una noche sin luna.

También Hendrik A. Lorentz (1853-1928), profesor en Leiden y decano de los físicos holandeses, admiraba el trabajo de Dirac y por ello le ofreció un puesto por dos años en la Universidad de Leiden, oferta que Dirac rechazó amablemente al serle concedida una nueva beca en Cambridge. En julio de 1927, tras diez meses en el continente, Dirac se reincorporó a la Universidad de Cambridge.

En solo dos años, Dirac se había convertido en uno de los físicos más renombrados a nivel internacional. Sus trabajos habían recibido un reconocimiento general considerándose de una gran originalidad y profundidad, aunque también de extrema dificultad. Por dicha razón, aun cuando toda la comunidad admiraba sus trabajos, su influencia era apreciablemente menor que la que tenían Heisenberg, Born y Jordan por una parte, y Schrödinger por otra. Esta situación empezó a cambiar a finales del año 1927 con la aparición de sus dos primeros trabajos sobre la interacción radiación-materia. Sin embargo, lo más espectacular estaba aún por llegar. A principios de 1928 Dirac llenó de asombro a todos sus colegas. La relatividad y la cuántica se daban la mano en una ecuación cuyas soluciones escondían asombrosas sorpresas, y también, problemas inesperados.

CAPÍTULO 3

El electrón relativista. La antimateria

La teoría cuántica del electrón es probablemente la mayor contribución de Dirac, quien consiguió unir en una ecuación los aspectos esenciales de las dos grandes teorías del siglo XX, la relatividad y la cuántica. La ecuación de Dirac incorporaba de forma natural la propiedad del espín y explicaba perfectamente el momento magnético del electrón. Sin embargo, también escondía hechos completamente inesperados: valores negativos de la energía; apareció así por primera vez el concepto de antimateria.

En octubre de 1927 tuvo lugar en Bruselas una nueva edición de las famosas conferencias Solvay y Dirac fue invitado, lo que muestra el grado de reconocimiento de su trabajo en aquellos momentos. El congreso de 1927 se ha hecho famoso por las acaloradas discusiones entre Bohr y Einstein sobre la fundamentación de la mecánica cuántica y el principio de incertidumbre de Heisenberg. Dirac asistió a dichas sesiones, donde conoció personalmente a Einstein, pero mantuvo una postura bastante pasiva. Él mismo escribió:

> Escuchaba las argumentaciones pero no participaba directamente en la discusión, porque no estaba muy interesado en el tema. [...] Creo que el trabajo fundamental de un físico matemático es obtener las ecuaciones correctas; la interpretación de dichas ecuaciones es de importancia menor.

En cierto momento del congreso, Dirac mencionó a Bohr que estaba trabajando en una ecuación relativista del electrón, ante lo cual el físico danés señaló que el problema ya había sido resuelto por Klein. La respuesta de Bohr causó una fuerte sorpresa en Dirac, quien no podía entender que tantos físicos estuviesen satisfechos con una teoría, la de Klein, que no satisfacía algunos de los principios fundamentales de la mecánica cuántica. En poco más de dos meses, el mundo de la física se vería sorprendido por

la propuesta de Dirac, y Bohr sería plenamente consciente del tremendo error que había cometido en su comentario.

PRIMEROS INTENTOS: LA ECUACIÓN DE KLEIN-GORDON

La fascinación que la teoría de la relatividad ejercía sobre Dirac hizo que este siempre tuviese en mente la incorporación de la misma al mundo cuántico. Lo intentó por primera vez tras la publicación del trabajo seminal de Heisenberg, aunque sin éxito. Algunos meses después, cuando estudió el efecto Compton y la formulación ondulatoria, Dirac hizo uso de una versión relativista de la ecuación de ondas; versión sobre la que ya habían trabajado varios físicos y que años después recibió el nombre de ecuación de Klein-Gordon (se denota como ecuación KG), la cual debe su nombre a los físicos Oskar Klein (1894-1977) y Walter Gordon (1893-1939). En aquellos momentos, Dirac no prestó especial atención a dicha ecuación, que consideró simplemente como «una herramienta matemática útil para el cálculo de los elementos de matriz, que podrían entonces interpretarse dentro del contexto de la mecánica matricial de operadores». Más aún, tras la formulación de su teoría de la transformación, Dirac concluyó que la ecuación KG era claramente inconsistente al no satisfacer propiedades básicas de la mecánica cuántica.

¿En qué consistía la ecuación cuántica relativista de Klein-Gordon, y por qué resultó inaceptable para Dirac? Para contestar a estas cuestiones y entender las reticencias de Dirac, debemos volver a comienzos de 1926, cuando Schrödinger estaba elaborando la formulación ondulatoria de la mecánica cuántica. Al igual que Dirac, el físico austríaco también era consciente de la importancia de incluir consideraciones relativistas en su formulación. De hecho, la primera ecuación cuántica de ondas que obtuvo incorporaba efectos relativistas y era consistente con la expresión clásica de la energía relativista. Sin embargo, Schrödinger nunca publicó dicha ecuación al comprobar que no podía reproducir el resultado de Sommerfeld para la constante de estructura fina.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA ECUACIÓN DE KLEIN-GORDON

En la mecánica relativista la masa depende del sistema de referencia inercial. Denominemos m a la masa propia de una partícula; es decir, la masa de la partícula en su propio sistema de referencia. Supongamos que dicha partícula se mueve con una velocidad $\vec{v}$. Por simplicidad, consideraremos el caso de una partícula libre, es decir, sin ningún tipo de interacción. En esta situación, la energía total y el momento cinético vienen dados por:

$$E = \gamma mc^2; \quad \vec{p} = \gamma m\vec{v}; \quad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

donde se ha introducido el denominado factor de Lorentz γ (descrito en el capítulo 1). Combinando las expresiones de la energía y el momento, se obtiene la siguiente relación:

$$E^2 = c^2\vec{p}^{\,2} + m^2c^4.$$

Obsérvese que para partículas en reposo la energía total es $E=mc^2$, y para partículas sin masa (el caso de los fotones) la energía viene dada por $E=cp$. Es posible construir la ecuación cuántica de ondas a partir de la expresión previa de la energía sustituyendo las variables clásicas por los correspondientes operadores cuánticos (principio de correspondencia):

$$E \Rightarrow i\hbar\frac{\partial}{\partial t}; \quad \vec{p} \Rightarrow -i\hbar\vec{\nabla}.$$

Haciendo uso de este principio, se obtiene la siguiente ecuación cuántica relativista:

$$-\hbar^2\frac{\partial^2\Phi(\vec{r},t)}{\partial t^2} = \left(-\hbar^2c^2\vec{\nabla}^2 + m^2c^4\right)\Phi(\vec{r},t).$$

Esta es la denominada ecuación de Klein-Gordon, que suele expresarse en una forma más concisa introduciendo el denominado operador de d'Alembert:

$$\Box \equiv \frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2\vec{\nabla}^2,$$

$$\left(\Box + \frac{m^2c^2}{\hbar^2}\right)\Phi(\vec{r},t) = 0.$$

La expresión previa se denomina forma «covariante» de la ecuación KG. El operador es claramente invariante bajo transformaciones de Lorentz, lo cual implica que la propia función de onda $\Phi(\vec{r},t)$ debe ser independiente del sistema de referencia inercial.

Este resultado, obtenido por Sommerfeld en 1915 haciendo uso de la teoría atómica de Bohr, reproducía perfectamente los niveles energéticos del átomo de hidrógeno, y por consiguiente, era un «test» esencial para cualquier teoría cuántica. En marzo de 1926 Schrödinger publicó su nueva ecuación, la que actualmente lleva su nombre, que no solo fue capaz de reproducir la fórmula de Sommerfeld, sino que modificó completamente la imagen de la mecánica cuántica, convirtiéndose con el paso del tiempo en la ecuación más famosa de la física —al mismo nivel que la equivalencia masa-energía de Einstein—. Sin embargo, la ecuación de Schrödinger no incorporaba la teoría relativista; al contrario, era consistente con las expresiones clásicas de la mecánica de Newton.

«Es una regla general que el creador de una nueva idea no es la persona más apropiada para su desarrollo. Su temor a que algo pudiese no funcionar es demasiado fuerte, impidiéndole en ocasiones tener el temple suficiente para llevar la teoría o idea hasta sus últimas consecuencias.»

— Paul Dirac.

En la primavera de 1926 Oskar Klein, trabajando de forma independiente a Schrödinger, obtuvo y publicó la primera ecuación cuántica relativista, ecuación que coincidía con la que previamente había obtenido el físico austríaco. En los meses siguientes, varios físicos —Vladímir Fock, Gordon, De Broglie, el mismo Schrödinger— trabajaron sobre dicha ecuación, analizando e interpretando sus soluciones. El hecho de que Schrödinger no se atreviese a publicar su ecuación relativista al ser incapaz de reproducir los datos experimentales, fue comentado por Dirac en los siguientes términos:

> Fue un ejemplo de un investigador que, encontrándose en el camino correcto, decidió no seguir adelante por su gran temor a equivocarse.

Según Dirac, Schrödinger no debería haberse preocupado tanto por el desacuerdo con el experimento.

La ecuación de Klein-Gordon es una ecuación diferencial en las variables espaciales y temporal, cuya solución viene dada por la función de ondas, en la cual se halla contenida toda la información física sobre el sistema que se está analizando. Al contrario de la ecuación de Schrödinger, la ecuación KG es consistente con la expresión relativista de la energía. Además, satisface las propiedades requeridas por la teoría de la relatividad; es decir, no se modifica frente a transformaciones de Lorentz. En otras palabras, la ecuación es válida independientemente del sistema de referencia inercial que se considere. La ecuación KG es una ecuación diferencial de segundo orden no solo en las variables espaciales —al igual que la de Schrödinger—, sino también en la variable temporal. Este hecho, que está relacionado directamente con la expresión relativista de la energía, fue el origen de continuos problemas en la interpretación de los resultados de la ecuación KG, llevando finalmente a su abandono durante algunos años.

La formulación de la mecánica ondulatoria con su ecuación de ondas permite no solo resolver dicha ecuación determinando la función de ondas, sino también introducir una densidad de probabilidad y una densidad de corriente que deben satisfacer la denominada «ecuación de continuidad» o «de conservación». Este es el caso de la ecuación KG, en la que se define una densidad de corriente que verifica las propiedades generales de la teoría relativista. Sin embargo, el problema fundamental de la ecuación KG surge con la interpretación de la densidad de probabilidad. En el caso de la ecuación de Schrödinger, la densidad de probabilidad, de acuerdo con la interpretación de Born, viene dada por el módulo al cuadrado de la función de ondas; es decir, es definida positiva. Por el contrario, la ecuación KG conduce a una densidad de probabilidad que puede ser positiva, negativa o nula. Este resultado era consecuencia de la forma singular de la ecuación KG con la presencia de una derivada de segundo orden en el tiempo. Esto significa que para conocer la función de ondas en un instante determinado es necesario no solo conocer la función de ondas en un instante anterior, sino también su derivada en dicho instante previo. En otras palabras, el hecho de que la ecuación KG sea de segundo orden en el tiempo implica que son necesarias

dos condiciones independientes para determinar completamente la función de ondas. Una consecuencia de este resultado es que la densidad de probabilidad puede ser negativa. Pero, ¿cómo explicar que la probabilidad de encontrar una partícula en un determinado lugar pueda ser negativa? Para Dirac este resultado no era más que el reflejo de la inconsistencia de la ecuación de Klein-Gordon, que no satisfacía propiedades básicas de la teoría cuántica tal y como él las había formulado en su teoría de la transformación.

A finales de 1926 la mayoría de los físicos eran conscientes de los problemas que aquejaban a la ecuación KG. No solo era difícil aceptar la existencia de densidades de probabilidad negativas, sino que tampoco parecía posible incluir en la ecuación la nueva propiedad cuántica del espín, propiedad que parecía estar íntimamente relacionada con la relatividad. Numerosos físicos estudiaron el problema intentando encontrar una versión «mejorada» de la ecuación KG e incluir los efectos del espín en el marco de la teoría de Schrödinger. Fue Dirac quien consiguió plantear el problema de una forma mucho más original; a partir de principios fundamentales desarrolló una ecuación en la que el espín surgía como consecuencia natural de la propia teoría relativista.

Es importante señalar que la ecuación de Klein-Gordon fue recuperada en 1934 por Pauli y Weisskopf, reinterpretando sus soluciones y la densidad de probabilidad como una densidad de carga. De esta forma, la ecuación KG se conoce hoy día como «ecuación cuántica relativista de espín cero», y se usa para describir el comportamiento de partículas sin espín, como es el caso de los piones. Estos existen en tres estados de carga eléctrica distinta: piones positivos, negativos y neutros, un reflejo del valor que puede adoptar la densidad de carga definida a partir de la propia ecuación.

EL ESPÍN DEL ELECTRÓN

La propiedad de espín se introdujo como consecuencia de ciertas evidencias experimentales que no podían explicarse con las teorías existentes: el efecto Zeeman anómalo y el experimento de Stern-

Gerlach. En ambos casos fue necesario introducir un nuevo número cuántico que permitiese caracterizar cómo se disponían los electrones en los átomos. En 1924 Pauli introdujo cuatro números cuánticos para describir los estados electrónicos; los tres primeros determinaban la posición espacial (n, l, m_l), y el cuarto, al que se denotó m_s y cuyo significado físico aún se desconocía, solo podía tomar dos valores. Al año siguiente, Pauli introdujo su famoso principio de exclusión, el cual permitía entender cómo se distribuían los electrones en los distintos átomos (su configuración electrónica).

Unos meses después, dos jóvenes estudiantes de la Universidad de Leiden (Holanda), Samuel A. Goudsmit (1902-1978) y George E. Uhlenbeck (1900-1988), asociaron el nuevo número cuántico con el momento angular correspondiente al movimiento de rotación del electrón sobre sí mismo. La explicación de Goudsmit y Uhlenbeck fue rápidamente cuestionada por las implicaciones que traía consigo. En primer lugar, el electrón debía tener tamaño finito, de modo que la propiedad de rotación sobre su propio eje tuviese sentido; es decir, el electrón no podía ser una partícula elemental o puntual. Por otra parte, los cálculos realizados por Lorentz mostraron que la velocidad angular en la superficie del electrón debía ser considerablemente mayor que la velocidad de la luz, en clara contradicción con la teoría de la relatividad. Estos resultados parecían claramente absurdos y, por consiguiente, Goudsmit y Uhlenbeck pidieron a su supervisor, Ehrenfest, que no enviase el trabajo para su publicación. La respuesta de Ehrenfest forma parte de la historia de la teoría cuántica:

> Hace ya tiempo que envié su trabajo. No se preocupen, ambos son lo suficientemente jóvenes como para permitirse algunas tonterías.

El espín es una propiedad fundamental que permite entender el comportamiento del mundo subatómico. Es un concepto que no tiene analogía en el mundo clásico; aparece como propiedad puramente cuántica. Por dicha razón, no puede interpretarse como una rotación de la partícula sobre su propio eje en el espacio de coordenadas; el espín no depende de los grados de libertad espaciales, es decir, no depende de las coordenadas ni de los momentos.

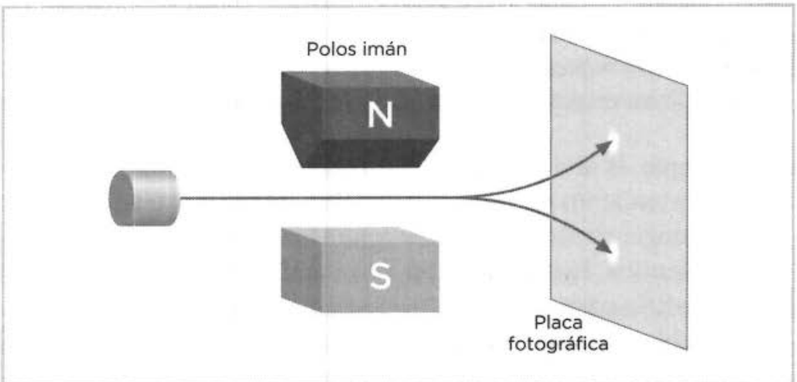
La ecuación de Schrödinger está definida exclusivamente en el espacio de coordenadas y, por consiguiente, la función de ondas depende únicamente de las coordenadas espaciales y temporal: $\Psi(\vec{r},t)$. El espín debe añadirse ad hoc como un nuevo grado de libertad. Solo de esta forma es posible explicar el desdoblamiento de las líneas espectrales en el átomo de hidrógeno observado en el efecto Zeeman anómalo, o los resultados del experimento de Stern-Gerlach con la división del haz en dos partes simétricamente distribuidas (véase la figura).

A mediados de 1926 la mayoría de los físicos consideraban que la presencia del espín era una consecuencia directa de la teoría de la relatividad aplicada al mundo cuántico. Esto explicaba que la ecuación de Schrödinger (consistente con la teoría no relativista) no contuviese ninguna información sobre el espín. El problema, sin embargo, era doble:

1. ¿Cómo incorporar el espín en la ecuación de Schrödinger?

2. Si el espín es un efecto asociado a la relatividad, ¿por qué no está presente en la ecuación KG, que sí es consistente con la expresión relativista de la energía?

La respuesta a la primera pregunta la proporcionó Pauli en mayo de 1927 cuando desarrolló su teoría del espín y la incorporó



Experimento de Stern-Gerlach. El haz de átomos emitido por la fuente se desdobla en dos componentes discretas al atravesar un campo magnético no homogéneo. Este resultado pone de manifiesto la cuantización del momento magnético del espín.

a la ecuación de Schrödinger. Surgió de esta forma la denominada «ecuación de Pauli». La segunda cuestión solo pudo resolverse tras la aparición de la ecuación cuántica relativista del electrón: la ecuación de Dirac.

LA ECUACIÓN DE PAULI

La teoría de Pauli se conoce hoy día como «teoría no relativista del espín». Para Pauli el espín del electrón debía interpretarse como un momento angular intrínseco. Así pues, introdujo tres operadores, definidos para las tres componentes espaciales, que satisfacían las relaciones generales de conmutación de los operadores cuánticos. La formulación era formalmente análoga a la correspondiente a los operadores asociados al movimiento del electrón en sus órbitas: momento angular cinético. Por otra parte, el hecho de que el número cuántico m_s asociado al espín solo pudiese tomar dos valores fue incorporado por Pauli a la teoría de Schrödinger proponiendo una función de ondas con dos componentes, cada una de ellas relacionada con uno de los dos posibles valores de m_s. Así pues, los operadores cuánticos de espín debían venir descritos como matrices 2×2. Pauli introdujo la notación siguiente:

$$S_i = \frac{\hbar}{2}\sigma_i,$$

donde el índice i se refiere a cualquiera de las tres componentes: x, y, z; y el término σ_i representa las denominadas «matrices de Pauli»:

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Los dos posibles valores de m_s eran: $\pm\frac{\hbar}{2}$.

Una vez definidos los operadores de espín, el siguiente paso de Pauli fue relativamente sencillo. Al igual que el electrón en

WOLFGANG E. PAULI



Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958) nació en Viena, pero en 1918 se trasladó a la Universidad de Múnich (Alemania), donde fue estudiante de Sommerfeld. Dos meses después de completar su doctorado, publicó un artículo monográfico sobre la teoría general de la relatividad, trabajo que fue calificado como «inmejorable» por el propio Einstein. En 1921 Pauli se desplazó a la Universidad de Gotinga, donde trabajó como ayudante de Born y conoció a Heisenberg, con quien mantuvo estrechos lazos durante el resto de su vida. Un año después fue contratado por el Instituto de Física Teórica de Copenhague, donde comenzó su relación con Niels Bohr. Entre 1923 y 1928 fue profesor en la Universidad de Hamburgo. Estos años coincidieron con sus sorprendentes contribuciones a la teoría cuántica. En 1924 introdujo el número cuántico asociado al espín, y en 1925, su famoso principio de exclusión, quizá su trabajo más renombrado.

Física cuántica y rigor

Tras la aparición del trabajo seminal de Heisenberg sobre la mecánica cuántica, Pauli tuvo una participación muy activa en la construcción de la nueva teoría: describió el espectro del átomo de hidrógeno, desarrolló su propia versión de la teoría cuántica del campo electromagnético e introdujo la primera descripción del espín. En 1928 Pauli fue nombrado profesor de Física Teórica en el Instituto Tecnológico de Zúrich (Suiza), donde permaneció el resto de su vida, con la excepción del período 1940-1945, época en la que se trasladó a Estados Unidos como profesor del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. En 1930 Pauli postuló la existencia de una nueva partícula, el neutrino, aunque tuvieron que transcurrir más de veinte años para que se detectase. Pauli fue famoso entre sus colegas por su carácter «hipercrítico». Toda nueva idea era sometida al implacable juicio de Pauli, que podía resultar, en ocasiones, «devastador» para el creador de la misma. Uno de sus típicos comentarios sobre los trabajos que consideraba de escasa relevancia era: «Ni siquiera es erróneo». Pauli siempre estuvo obsesionado por los aspectos de fundamentación de la teoría cuántica. Su excesivo sentido crítico, también aplicado a sí mismo, junto a su profundo conocimiento de la física, fueron en cierta medida obstáculos que le impidieron desarrollar trabajos de mayor originalidad.

una órbita posee un momento cinético orbital, también tiene un momento intrínseco asociado al espín. Este momento intrínseco puede acoplarse con cualquier campo magnético externo. Pauli aplicó su modelo al átomo de hidrógeno, comprobando que la presencia del espín en el hamiltoniano daba lugar a un término de interacción con el propio momento angular orbital del electrón.

Es incuestionable que la teoría de Pauli tuvo un gran éxito, puesto que explicaba diversos hechos, entre ellos, el efecto Zeeman anómalo y el experimento de Stern-Gerlach. Sin embargo, el mismo Pauli era consciente de los límites de su teoría. Pauli incluyó el espín en la ecuación original de Schrödinger como una simple corrección relativista. De hecho, la teoría de Pauli solo podía reproducir la expresión aproximada (de primer orden) de la constante de estructura fina de Sommerfeld. Además, la ecuación de Pauli no era consistente con el principio de relatividad. El mismo Pauli reconoció que «uno debe requerir de la teoría final que se formule en una forma invariante relativista y que además permita realizar cálculos de orden superior». Este fue el camino emprendido por Dirac: formular la ecuación a partir de los principios fundamentales de ambas teorías, la relatividad y la cuántica.

LA ECUACIÓN DE DIRAC

El 2 de enero de 1928 se recibió en la revista *Proceedings of the Royal Society* el artículo titulado: «La teoría cuántica del electrón», enviado por Fowler y firmado por Dirac. En el mismo, Dirac escribió:

> En este trabajo se muestra que la falta de completitud de las teorías previas [ecuación KG y teoría de Pauli del espín] se debe a que no son consistentes con la relatividad o, alternativamente, con la teoría general de la transformación de la mecánica cuántica. Parece que el hamiltoniano más simple para un electrón puntual que satisfaga los principios básicos tanto de la relatividad como de la teoría de la transformación permite explicar todas las evidencias experimentales sin necesidad de realizar ninguna suposición adicional.

En este párrafo se muestra el camino que emprendió Dirac para construir su ecuación cuántica relativista. Por una parte, la ecuación debía respetar los principios básicos de la teoría cuántica tal y como estaban formulados en la teoría de la transformación: «El estado inicial de un sistema determina totalmente el estado del mismo en un instante posterior». Esto significaba que la ecuación de ondas debía ser una ecuación diferencial de primer orden en el tiempo. De esta forma, la función de ondas en cualquier instante determinaba la función de ondas en un instante posterior. Esta formulación —que es consistente con la ecuación de Schrödinger, pero se aleja de la ecuación KG— conducía a una densidad de probabilidad definida positiva. Este resultado también estaba relacionado con otro de los aspectos fundamentales de la teoría de la transformación de Dirac: el operador hamiltoniano del sistema debía ser hermítico. Esta propiedad aseguraba que los valores propios de dicho operador, es decir, las energías del sistema, fuesen reales.

El segundo principio básico que guía la formulación de Dirac es el principio de relatividad. La ecuación cuántica relativista debe ser válida en cualquier sistema de referencia inercial. Sin embargo, ¿cómo introducir este aspecto en la construcción de la ecuación? El procedimiento de Dirac, por su belleza y simplicidad, es una muestra de su enorme genio creativo. Por una parte, en el contexto de la teoría relativista, el tiempo y las coordenadas espaciales son componentes del denominado «cuadrivector espacio-tiempo». Dirac concluyó entonces que no existía ninguna razón para tratar ambos tipos de variables de forma distinta en la ecuación cuántica de ondas. Por el contrario, si la ecuación de ondas debía ser de primer orden en la derivada temporal —por consistencia con la teoría cuántica—, la teoría relativista implicaba que las variables espaciales debían asimismo introducirse a través de sus primeras derivadas. Este tratamiento simétrico del tiempo y del espacio estaba en consonancia con la formulación relativista, pero se alejaba de la ecuación no relativista de Schrödinger, en la cual, las variables de tiempo y espacio aparecen de forma distinta: derivada de primer orden en el tiempo y de segundo orden en el espacio. Para Dirac, la simetría era una condición básica de la teoría relativista, que a su vez, debía resultar consistente con la expresión relativista de la energía:

OPERADORES HERMÍTICOS Y MATRICES DE PAULI

Los operadores hermíticos son esenciales en la teoría cuántica puesto que los valores propios asociados a los mismos son reales. En el caso del operador hamiltoniano, la propiedad de «hermiticidad» nos asegura que la energía del sistema que se está estudiando es real. Se dice que un operador es hermítico cuando coincide con su adjunto. Consideremos el caso general de un operador cuántico representado en forma matricial por una matriz 2×2:

$$\hat{O} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}.$$

El operador adjunto viene dado por la matriz construida a partir de la original cambiando filas por columnas y tomando para cada una de sus componentes sus respectivos valores complejos conjugados. Se denomina matriz adjunta:

$$\hat{O}^{\dagger} = \begin{pmatrix} a_{11}^{*} & a_{21}^{*} \\ a_{12}^{*} & a_{22}^{*} \end{pmatrix}.$$

Si ambas matrices coinciden, es decir, $\hat{O} = \hat{O}^{\dagger}$ se dice que la matriz $\hat{O}$ es hermítica, y puede demostrarse que sus valores propios son reales. Las tres matrices de Pauli, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, son hermíticas y «anticonmutan» entre sí, es decir, satisfacen las relaciones generales impuestas por la ecuación de Dirac. Sin embargo, puede demostrarse que cualquier matriz de dimensión 2×2 puede escribirse siempre como una combinación lineal de las tres matrices de Pauli más la matriz identidad. Esto significa que resulta imposible encontrar una cuarta matriz que «anticonmute» con cada una de las tres matrices de Pauli. En otras palabras, la ecuación de Dirac exige que la dimensión de los cuatro coeficientes matriciales que deben determinarse sea superior a 2×2. Por otra parte, de las relaciones generales de «anticonmutación» que deben verificar las matrices de Dirac se concluye que la traza de las mismas debe ser cero. Se denomina «traza de una matriz» a la suma de los elementos de la diagonal. Obsérvese que la traza de las matrices de Pauli es nula. En el caso en que el número de filas y columnas de las matrices fuese impar, sería imposible satisfacer las condiciones generales impuestas por la ecuación de Dirac.

$$E = \sqrt{c^2 p^2 + m^2 c^4} \text{ (partícula libre).}$$

En resumen, la búsqueda emprendida por Dirac de una nueva ecuación cuántica relativista para el electrón puede establecerse en los siguientes términos:

1. Debe ser una ecuación diferencial de primer orden en el tiempo que incorpore las variables espaciales en forma simétrica, es decir, también con derivadas de primer orden.

2. El operador hamiltoniano debe ser hermítico, de modo que la densidad de probabilidad sea definida positiva y las energías reales.

3. Debe reproducir la energía relativista y ser válida en cualquier sistema de referencia inercial.

Dirac propuso la siguiente ecuación general:

$$i\hbar\frac{\partial\Psi(\vec{r},t)}{\partial t}=\hat{H}\Psi\left(\vec{r},t\right)=$$
$$=\left\{-i\hbar c\left(\alpha_x\frac{\partial}{\partial x}+\alpha_y\frac{\partial}{\partial y}+\alpha_z\frac{\partial}{\partial z}\right)+\beta mc^2\right\}\Psi\left(\vec{r},t\right).$$

Obsérvese que ambos tipos de variables —tiempo y espacio— se incluyen de forma similar. Asimismo, existe un término adicional, βmc^2 que está relacionado con la masa propia del electrón, es decir, con la masa del mismo en el sistema en que se encuentra en reposo. La ecuación previa depende de cuatro coeficientes desconocidos: α_x, α_y, α_z, β. La cuestión es: ¿cómo determinarlos? Para ello, Dirac debía demostrar la consistencia entre su ecuación y la expresión relativista de la energía.

Dirac era consciente de la «equivalencia» entre los operadores cuánticos y las correspondientes magnitudes clásicas. De hecho, esta correspondencia había permitido explicar la forma de la ecuación de Schrödinger y la ecuación de Klein-Gordon. Haciendo uso de dicha analogía entre el mundo cuántico y el clásico, la ecuación cuántica que Dirac estaba proponiendo conducía a la siguiente ecuación clásica para la energía:

$$E=c\,(\alpha_x p_x+\alpha_y p_y+\alpha_z p_z)+\beta mc^2.$$

¿Cómo relacionar esta ecuación lineal en las tres componentes del momento cinético con la complicada expresión relativista

de la energía en la que aparece la raíz cuadrada? Dirac estaba intentando encontrar un método que le permitiese «linealizar» la ecuación relativista de la energía, determinando los cuatro coeficientes desconocidos. El primer gran logro de Dirac fue descubrir que su ecuación cuántica solo podía ser consistente con la expresión relativista de la energía si los coeficientes que había introducido no conmutaban entre sí y, además, sus cuadrados se reducían a la identidad. Matemáticamente se expresa en la forma:

$$\alpha_i\alpha_j = -\alpha_j\alpha_i\,(i \neq j);\ \alpha_i\beta = -\beta\,\alpha_i;\ \alpha_i^{\,2} = \beta^2 = 1.$$

Los índices i, j se refieren a cualquiera de las tres componentes espaciales: x, y, z. Así pues, los coeficientes no podían ser números-c, y Dirac los interpretó como matrices, lo cual requería a su vez que la función de ondas, Ψ, además de la dependencia en las variables espaciales y temporal, tuviese varias componentes. Este resultado no era novedoso. El año previo, 1927, Pauli había introducido ya sus funciones de onda con dos componentes relacionadas con los dos posibles valores del espín.

Sin embargo, el problema aún no estaba resuelto. El carácter hermítico del hamiltoniano implicaba que las cuatro matrices debían ser a su vez hermíticas. Dirac pensó en un primer momento en las matrices de Pauli, las cuales satisfacían todas las condiciones requeridas. Sin embargo, las matrices de Pauli eran solo tres, y Dirac necesitaba encontrar cuatro para construir su ecuación. Tras algún tiempo de estudio, Dirac llegó a la conclusión de que resultaba imposible añadir una cuarta matriz a las tres de Pauli. De hecho, este resultado era ya conocido en aquellos años por los matemáticos que habían demostrado que para matrices cuadradas de dimensión $N \times N$, el número máximo de matrices hermíticas independientes, y que «anticonmutasen» entre sí, venía dado por $N^2 - 1$. Por consiguiente, la única posibilidad que tenía Dirac era aumentar la dimensión de las matrices. Tras demostrar que la dimensión de las mismas debía ser necesariamente par, Dirac introdujo finalmente cuatro matrices hermíticas independientes de dimensión 4×4. Esta era la mínima dimensión que resultaba consistente con las propiedades generales de su ecuación. Dirac señaló:

MATRICES Y FORMA COVARIANTE DE LA ECUACIÓN DE DIRAC

La ecuación de Dirac aparece grabada en la placa conmemorativa que se encuentra en la abadía de Westminster. Sin embargo, la forma en la que aparece escrita corresponde a la denominada «formulación covariante». Con ello, se expresa que la forma de la ecuación es la misma en cualquier sistema de referencia inercial, un resultado básico en relatividad. Para simplificar la forma de escribir las ecuaciones, en la teoría cuántica relativista es habitual considerar tanto la constante reducida de Planck, $\hbar$, como la velocidad de la luz, c, iguales a la unidad. Ello se denomina «sistema natural de unidades». La ecuación de Dirac se expresa entonces en la forma:

$$i\frac{\partial\Psi}{\partial t} = -i\sum_{k=x,y,z}\alpha_k\frac{\partial\Psi}{\partial r_k} + M\beta\Psi = (-i\alpha\cdot\nabla + M\beta)\Psi,$$

donde se ha introducido el denominado operador nabla, ∇, y se ha hecho uso de la expresión:

$$\alpha\cdot\nabla = \alpha_x\frac{\partial}{\partial x} + \alpha_y\frac{\partial}{\partial y} + \alpha_z\frac{\partial}{\partial z}.$$

Las matrices de Dirac se pueden expresar directamente en función de las matrices de Pauli, σ_k, en la forma siguiente:

$$\alpha_k = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_k \\ \sigma_k & 0 \end{pmatrix} \text{ y } \beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

> Necesité varias semanas para darme cuenta de que no era necesario hacer uso de variables con solo dos filas y dos columnas. ¿Por qué no considerar cuatro filas y cuatro columnas?

Muchos años después, Dirac recordaba: «Mirando hacia atrás, me resulta extraño que me costase tanto tiempo resolver un aspecto tan elemental». Dirac llevó las matemáticas a sus últimas consecuencias, y la necesidad de introducir dimensiones adicionales le forzó a aceptar funciones de onda descritas por cuatro componentes cuyo significado físico, aparte de los dos posibles estados del espín, trae-

Introduciendo la notación: $\gamma^0 \equiv \beta$; $\gamma^k \equiv \beta\alpha_k$, y multiplicando la ecuación de Dirac previa a la izquierda por la matriz β puede expresarse finalmente:

$$\left[i\left(\gamma^0 \frac{\partial}{\partial t} + \gamma^0 \alpha \cdot \nabla\right) - M\right]\Psi = 0 \Rightarrow \boxed{(i\gamma \cdot \partial - M)\Psi = 0}.$$

La ecuación recuadrada coincide con la expresión grabada en Westminster. A pesar de su aparente simplicidad, nótese que en realidad son cuatro ecuaciones diferenciales acopladas. Se conoce como «forma covariante de la ecuación de Dirac para electrones libres», e incorpora el operador:

$$\gamma \cdot \partial \equiv \gamma^0 \frac{\partial}{\partial t} + \gamma^x \frac{\partial}{\partial x} + \gamma^y \frac{\partial}{\partial y} + \gamma^z \frac{\partial}{\partial z}.$$

El valor de la ecuación

Dirac no solo introdujo esta forma de su ecuación en su trabajo original de 1928, sino que, además, demostró que satisfacía la propiedad de invariancia bajo transformaciones de Lorentz. De este modo, la ecuación de Dirac constituía, sin ninguna duda, una descripción satisfactoria del comportamiento cuántico de las partículas subatómicas: proporcionaba la relación momento-energía relativista, daba lugar a una densidad de probabilidad definida positiva con valores reales de la energía, y por último, era consistente con el principio de relatividad de Einstein.

ría de cabeza a los físicos durante los años siguientes. La teoría de Dirac del electrón es un ejemplo de lo que Wigner denominó «la irracional eficacia de las matemáticas en las ciencias naturales».

ÉXITOS ASOMBROSOS, PROBLEMAS INESPERADOS

La ecuación de Dirac llenó de asombro a todos sus colegas. Algunos de ellos llevaban meses trabajando arduamente en la cons-

trucción de una ecuación cuántica relativista, y el descubrimiento del trabajo de Dirac les dejó perplejos y con una gran sensación de frustración. Jordan señaló: «No puedo perdonarme el no haber sido capaz de ver que el punto esencial era encontrar una expresión lineal». A pesar de ello, Jordan reconoció la grandeza del trabajo de Dirac: «Hubiese preferido haber encontrado yo la ecuación, pero la formulación de Dirac es tan maravillosa y la ecuación tan concisa, que todos debemos sentirnos felices de tenerla». Esta opinión era compartida por la práctica totalidad de físicos. Heisenberg manifestó: «Tengo en la más alta consideración su último trabajo sobre el espín», y Ehrenfest: «Encuentro el último trabajo de Dirac sobre el espín del electrón simplemente espléndido».

«La deducción del espín fue considerada como un milagro. El sentimiento general era que Dirac había conseguido más de lo que merecía. Nadie antes había hecho física en esa forma. Definitivamente, la ecuación de Dirac fue considerada como la solución; una absoluta maravilla.»

— Léon Rosenfeld, físico belga colaborador de Born en Gotinga.

El entusiasmo que generó la ecuación de Dirac no solo fue debido a la forma en la que surgió de la mente de Dirac, con la supremacía de los principios básicos de la física sobre cualquier método empírico, sino también a las soluciones que proporcionó. La propiedad de espín surgía como una consecuencia natural de la propia estructura de la ecuación, que a su vez era resultado inevitable de los principios básicos de las dos grandes teorías de la física: relatividad y cuántica. La ecuación proporcionaba el momento magnético del electrón y era capaz de reproducir la expresión exacta de la constante de estructura fina.

El término de interacción entre el espín del electrón y su momento angular orbital en el átomo de hidrógeno también surgía de forma automática, incorporando además el factor de Thomas. Este era un efecto puramente relativista relacionado con la transformación entre los sistemas de referencia asociados al electrón

y al protón (núcleo), y que era necesario introducir «a mano» en la ecuación de Pauli. Por último, la ecuación de Dirac se reducía a la de Schrödinger o a la de Pauli en el límite de energías cinéticas pequeñas comparadas con la energía propia del electrón. La ecuación de Dirac fue, sin duda alguna, uno de los logros más impactantes de la física en el siglo XX. Sin embargo, la ecuación trajo consigo también una enorme confusión. Heisenberg recordaba muchos años después:

> Hasta principios de 1928 tenía la impresión que, en la teoría cuántica, habíamos conseguido arribar a un puerto seguro. El trabajo de Dirac nos lanzó a todos de nuevo al mar.

Las dificultades asociadas con la ecuación de Dirac estaban implícitas en la propia estructura de la ecuación. Si para describir el espín solo se necesitaban dos componentes, ¿qué sentido tenían las dos dimensiones adicionales que aparecían en la ecuación de Dirac? Hubieron de transcurrir varios años para entender claramente el significado físico contenido en las soluciones de la ecuación de Dirac. Sin embargo, la estructura matemática de la ecuación no dejaba lugar a dudas: las soluciones correspondían no solo a electrones ordinarios con energía positiva, sino también a electrones con energía negativa.

Dirac fue consciente de esta dificultad desde el primer momento. De hecho, señaló que la presencia de ambos tipos de soluciones, energías positivas y negativas, resultaba inevitable en cualquier teoría cuántica relativista. En su trabajo seminal sobre el electrón, Dirac menciona las dos grandes dificultades que aquejaban la teoría previa de Klein-Gordon:

1. No ser una ecuación lineal en la energía, o análogamente, en la derivada temporal.

2. Validez de la ecuación tanto para electrones con carga $+e$, como para electrones con carga $-e$.

Dirac escribió en su trabajo:

> Algunas de las soluciones de la ecuación de onda son paquetes de onda describiendo una partícula de carga $-e$, mientras que otras corresponden a una partícula de carga $+e$. Para esta segunda clase de soluciones la energía E tiene un valor negativo.

Nótese que Dirac estaba asociando las soluciones de energía negativa con partículas cuya carga era opuesta a la del electrón. La ecuación de Dirac resolvió la primera dificultad pero no dio respuesta a la segunda. Por dicha razón, Dirac consideró en un primer momento que su teoría era una simple aproximación al problema, y señaló:

> La verdadera ecuación relativista de onda debe ser tal que sus soluciones se dividan en dos conjuntos independientes, cada uno de ellos correspondiendo a partículas de carga $-e$ y $+e$, respectivamente.

Además, Dirac mencionaba en su trabajo que todas esas soluciones asociadas a electrones de carga $+e$ debían eliminarse; sin embargo, al mismo tiempo era consciente de las diferencias esenciales que existían entre la teoría clásica y la teoría cuántica y sus posibles implicaciones respecto al nuevo tipo de soluciones:

> En la teoría clásica uno elimina la dificultad excluyendo arbitrariamente todas aquellas soluciones que corresponden a una energía negativa. En la teoría cuántica no puede hacerse esto, puesto que en general cualquier perturbación puede producir transiciones de estados con energía positiva a estados con energía negativa. Este tipo de transiciones corresponderían experimentalmente a un proceso en el que un electrón modifica súbitamente su carga de un valor $-e$ a $+e$. Este fenómeno aún no ha sido observado.

Los párrafos previos ponen claramente de manifiesto la gran dificultad conceptual que originó la ecuación de Dirac y la interpretación física de sus soluciones. Obsérvese que el propio Dirac expresó argumentaciones contradictorias en su trabajo. En los meses siguientes a la aparición de la ecuación, el problema de las soluciones de energía positiva/negativa se convirtió en uno de

los mayores quebraderos de cabeza para toda la comunidad de física cuántica. Heisenberg llegó a escribir en una carta dirigida a Pauli: «El capítulo más penoso de la física moderna es la teoría de Dirac».

AÑOS DE VIAJES Y CONFUSIÓN

Un mes después de la aparición de la ecuación relativista del electrón, Dirac publicó un segundo trabajo en el que aplicó su teoría a determinados problemas concretos: las reglas de selección en transiciones atómicas y el efecto Zeeman. Sin embargo, la situación sobre la ecuación de Dirac y la interpretación de sus soluciones de energía negativa seguía siendo de confusión total. Coincidiendo con este período, Dirac realizó una serie de viajes a diversos centros, donde impartió seminarios sobre su nueva teoría. Durante la primavera y verano de 1928 visitó Copenhague, Leiden, Leipzig y Gotinga. En Leipzig coincidió con Heisenberg, que acababa de ser nombrado profesor en dicha universidad y con quien mantuvo numerosas discusiones. Heisenberg mostró en diversos escritos la gran frustración que le producía la ecuación de Dirac. En una carta dirigida a Jordan señaló:

> Dirac ha estado aquí y ha impartido varios seminarios sobre su nueva teoría; sin embargo, ha sido incapaz de resolver las dificultades presentes.

Durante los meses siguientes los sentimientos de frustración y confusión en Heisenberg aumentaron aún más. En una carta dirigida a Bohr afirmó:

> Tras un estudio más cuidadoso de la teoría de Dirac, encuentro las dificultades mucho más serias de lo que me habían parecido al principio. [...] La situación presente es bastante absurda, y casi desesperante. [...] He decidido cambiar de campo de estudio, los próximos meses me dedicaré al ferromagnetismo.

Un sentimiento similar invadía a Dirac, aunque este nunca lo reconociese de forma tan explícita. En julio de 1928, admitió ante Klein que «hasta el momento todos mis intentos para resolver la dificultad de las soluciones positivas/negativas han fracasado».

Tras finalizar su estancia en Gotinga, Dirac decidió visitar la Unión Soviética. En los años sucesivos, incluso en períodos de grandes dificultades, Dirac visitó con frecuencia este país, siendo uno de los físicos que mantuvo un contacto más directo con sus colegas rusos. Con algunos de ellos, como Kapitsa y Tam, estableció lazos de amistad que perduraron toda su vida.

LA PARADOJA DE KLEIN

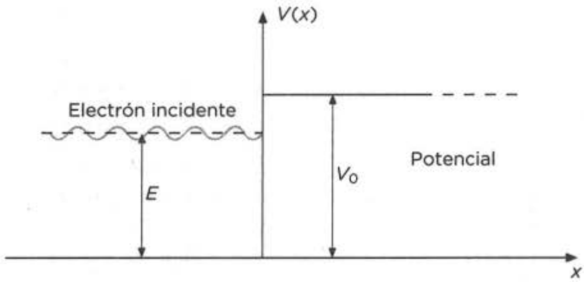
Uno de los problemas típicos que cualquier estudiante de física debe resolver en un curso de física cuántica es el de un electrón aproximándose a una barrera de potencial de altura determinada (véase la figura). El problema se plantea describiendo el electrón mediante la ecuación de Schrödinger, y se analiza el comportamiento de la función de onda en presencia de la barrera de potencial. De esta forma, se pueden calcular los coeficientes de transmisión y reflexión, es decir, la probabilidad de que la función de onda del electrón se transmita a través de la barrera, y la cantidad de flujo reflejado. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto algunas propiedades puramente cuánticas. Así, se puede comprobar que, aunque el electrón incidente tenga una energía algo menor que la altura de la barrera de potencial, existe una cierta probabilidad no nula de transmisión de la función de onda. Clásicamente, en esta situación, el electrón no podría atravesar la barrera en ningún caso.

¿Cómo aparece la paradoja?
La denominada «paradoja de Klein» surge cuando el estudio se realiza haciendo uso de la ecuación de Dirac. Klein analizó este problema y comprobó que los resultados que obtenía en determinadas situaciones eran completamente distintos a los que surgían de la ecuación de Schrödinger; resultados muy difíciles de entender y aparentemente absurdos. Así, comprobó que para un potencial suficientemente intenso, mayor que la energía total (energía cinética más energía propia) del electrón, la función de onda transmitida no presentaba un comportamiento exponencial decreciente, como sucede con la ecuación de Schrödinger, sino que mantenía su forma oscilatoria con energías negativas. Análogamente, el estudio de las probabilidades de transmisión y reflexión de la función de onda incidente a través de la barrera muestra que existe más

Dirac regresó a Cambridge en otoño de 1928 y permaneció allí los seis meses siguientes, durante los cuales comenzó a trabajar en lo que unos años después sería su libro sobre la teoría cuántica. Paralelamente, surgieron nuevos estudios de la ecuación de Dirac que arrojaron aún más confusión sobre la misma. Por una parte, Klein analizó el problema de un electrón relativista moviéndose contra una barrera de potencial. Los resultados en algunas situaciones parecían absurdos. Este problema se denomina «paradoja de Klein».

Unos meses después, el propio Klein y el físico japonés Yoshio Nishima (1890-1951) desarrollaron, haciendo uso de la ecua-

flujo reflejado que el existente inicialmente. Este incomprensible resultado va íntimamente ligado al hecho de que exista también transmisión de flujo asociado a una carga opuesta a la del electrón incidente; en otras palabras, la onda transmitida está ligada a soluciones de energía negativa. Los resultados de la paradoja de Klein aparecen también cuando el análisis se realiza con la ecuación de Klein-Gordon; es decir, son una consecuencia natural del uso de una ecuación cuántica relativista. La paradoja de Klein pone de manifiesto la imposibilidad de mantener una descripción cuántica relativista de una sola partícula subatómica en presencia de potenciales de interacción; en otras palabras, la presencia de interacción permite la creación de partículas en consonancia con el principio de equivalencia masa-energía de Einstein. La paradoja de Klein nos muestra que la interacción inevitablemente produce el acoplamiento o transición entre los dos tipos de solución de la ecuación de Dirac: energía positiva y negativa. Recuérdese que el número de partículas no se conserva en la teoría cuántica relativista, una diferencia esencial con la teoría no relativista y la ecuación de Schrödinger.



ción de Dirac, una teoría para describir la dispersión de fotones por electrones libres. Los resultados obtenidos solo estaban de acuerdo con los datos experimentales si se incluía la contribución de las componentes de energía negativa. ¿Cómo era posible que la misma teoría condujese a resultados aparentemente absurdos en algunas situaciones y, sin embargo, fuese capaz de describir el comportamiento de la naturaleza solo cuando todas sus componentes se tenían en cuenta?

Durante la mayor parte del año 1929 Dirac mantuvo una postura expectante ante las dificultades que parecían ir surgiendo cada día sobre su ecuación. Seguía manteniendo una confianza absoluta en la corrección y consistencia de su teoría, pero no sabía cómo resolver las cuestiones que continuamente planteaban sus colegas. Dirac decidió hacer un paréntesis y se trasladó durante varios meses a la Universidad de Wisconsin en Madison (Estados Unidos). Este fue su primer viaje al continente americano. Allí se encontró con Heisenberg, invitado a su vez por la Universidad de Chicago.

Durante esta primera etapa americana de Dirac surgieron numerosas anécdotas que se han hecho muy conocidas. Para apreciar aún mejor el extraño carácter del físico, mencionemos a modo de ejemplo una de ellas. En cierta ocasión, tras finalizar Dirac un seminario, el moderador preguntó a los asistentes si alguien tenía alguna pregunta o duda. Alguien en la audiencia se puso en pie y dijo: «Profesor Dirac, no entiendo la ecuación que usted ha escrito en la pizarra». Dirac permaneció completamente en silencio, ante lo cual la situación empezó a resultar bastante incómoda. Finalmente, el moderador se vio obligado a intervenir pidiendo a Dirac que diese alguna respuesta. Dirac señaló: «No fue una pregunta, fue un simple comentario». Está claro que Dirac no era capaz de entender entre líneas, y ello le llevaba en ocasiones a que no supiese tratar con tacto a sus semejantes.

Heisenberg y Dirac decidieron viajar juntos desde Estados Unidos a Japón, donde ambos habían sido invitados a impartir varias conferencias en las universidades de Tokio y Kioto. Se ha especulado mucho sobre si durante dicho viaje ambos físicos discutieron acerca de la problemática asociada a la ecuación de Dirac. En palabras de Dirac:

> En 1929 Heisenberg y yo cruzamos el Pacífico y estuvimos un tiempo en Japón. Sin embargo, no mantuvimos ninguna discusión sobre aspectos técnicos. Ambos queríamos disfrutar de unas vacaciones y alejarnos de la física. Las únicas discusiones que mantuvimos sobre física fueron durante los seminarios que ambos impartimos en Japón.

Dirac regresó a Cambridge en octubre de 1929 e inmediatamente empezó a trabajar en una nueva idea que, en su opinión, proporcionaría una respuesta a todas las dificultades asociadas a las soluciones positivas/negativas. El nuevo trabajo de Dirac tomaba como punto de partida la sugerencia realizada por Weyl en la primavera de 1929:

> Parece plausible pensar que de los dos pares de soluciones de la ecuación de Dirac, uno de ellos corresponde al electrón y el otro al protón.

Una vez más, dos años después de la aparición de la ecuación relativista del electrón, Dirac volvió a dejar perplejos a la mayoría de sus colegas con una idea que fue recibida con entusiasmo por muy pocos físicos. La posición dominante fue de gran escepticismo, incluso de rechazo. Sin embargo, para resolver una gran dificultad conceptual, Dirac se vio obligado a introducir una idea aún más atrevida, que a su vez trajo consigo nuevos problemas asociados. En dicha idea también se hallaba contenido el germen de la solución final y, además, una sorpresa imposible de imaginar en aquellos momentos: las antipartículas.

LA TEORÍA DE AGUJEROS. ELECTRONES Y PROTONES

Las componentes de energía negativa eran una consecuencia de la propia ecuación relativista que no podían ignorarse; sin embargo, Dirac señaló que tales estados no podían identificarse directamente con partículas físicas, como había propuesto Weyl, sin caer en paradojas y situaciones absurdas. La nueva interpretación de Dirac de los estados de energía negativa fue presentada en un

trabajo titulado: «Una teoría de electrones y protones», enviado para su publicación a primeros de diciembre de 1929. Al contrario de la mayoría de trabajos previos de Dirac, el nuevo estudio apenas contenía ecuaciones y su lectura resultaba bastante más fácil.

Antes de que su trabajo apareciese publicado, Dirac mantuvo correspondencia con Bohr mencionando en varias cartas las ideas esenciales de su nueva teoría. Bohr se mostró muy escéptico con la interpretación de Dirac, considerando incluso algunos aspectos de la misma claramente absurdos. No fue el único. El mismo mes de diciembre de 1929, Heisenberg escribía a Bohr en los siguientes términos:

> Dirac ha escrito un nuevo trabajo sobre el problema $\pm e$; [...] soy muy escéptico porque las masas del protón y electrón deberían ser iguales.

Heisenberg envió sus objeciones al propio Dirac:

> Creo que su nueva teoría se aleja demasiado de cualquier correspondencia con las leyes clásicas, y también con las evidencias experimentales.

¿En qué consistía la nueva teoría de Dirac para recibir críticas tan severas? ¿Por qué Dirac no podía aceptar la propuesta original de Weyl? Dirac señaló que la identificación directa de las soluciones de energía negativa con protones traía consigo paradojas que no podían aceptarse. Por ejemplo, mencionó que una transición de un electrón desde un estado de energía positiva a otro de energía negativa sería interpretada como un cambio de electrón a protón. Este hecho estaría en contradicción con la conservación de la carga eléctrica. Asimismo, un electrón de energía negativa tendría menos energía cuanto más rápidamente se desplazase, situación incomprensible. Dirac señaló en su trabajo que la única forma de superar estas dificultades era reinterpretar las soluciones correspondientes a electrones con energía negativa y su relación con partículas físicas.

La hipótesis que Dirac realiza es la siguiente: «Todos los estados de energía negativa están ocupados por electrones». Con esta suposición ningún electrón con energía positiva puede decaer en

un estado de energía negativa, puesto que dicho estado está ya ocupado, y el principio de exclusión de Pauli impide que dos electrones puedan ocupar el mismo estado cuántico. Dirac resuelve de esta forma el problema de las transiciones, pero a costa de introducir un número infinito de electrones en estados de energía negativa. A pesar de las objeciones indicadas por Bohr —los electrones producirían una densidad de carga negativa infinita—, Dirac señaló que dicha distribución sería totalmente uniforme y, por consiguiente, no tendría ningún efecto observable. Solo pequeñas alteraciones de esta situación de homogeneidad, por ejemplo, a través de un reducido número de estados de energía negativa desocupados, producirían efectos que podrían detectarse.

Dirac introdujo por primera vez en la física una imagen del estado del vacío cuántico. Este estaba constituido por una infinidad de electrones ocupando estados de energía negativa. Esta situación correspondería al estado de máxima estabilidad y se conoce hoy día como «mar de Dirac». Aunque la idea era ingeniosa y le permitió «resolver» las paradojas antes mencionadas, no es extraño que la mayoría de los físicos mostrasen un gran escepticismo, cuando no absoluto rechazo, a la nueva interpretación. No era fácil aceptar que el estado de vacío cuántico viniese descrito por un número infinito de electrones.

En todo caso, Dirac señaló que solo los estados de energía negativa que no estuviesen ocupados por electrones producirían efectos físicos. Un estado vacante o hueco en el mar de Dirac, es decir, la ausencia de un electrón, se comportaría a todos los efectos como un estado de energía positiva y carga también positiva. Dirac concluyó:

> Por consiguiente, llegamos a la conclusión de que los agujeros en la distribución de estados correspondientes a electrones de energía negativa son los protones.

La identificación de los huecos directamente con los protones permitió a Dirac señalar:

> De esta forma podemos resolver las dificultades y situaciones paradójicas mencionadas al comienzo, y solo se requiere postular un tipo

de partícula fundamental, en lugar de dos, electrón y protón, como ha sido necesario hasta el momento.

En otras palabras, la nueva teoría de Dirac proporcionaba una explicación unitaria de ambas partículas, electrón y protón, que podían considerarse como dos manifestaciones de un único estado fundamental.

La teoría de agujeros de Dirac, con la identificación de los huecos con los protones, traía consigo dos dificultades añadidas. En primer lugar, la presencia de un hueco —o existencia de un protón— implicaba que un electrón con energía positiva podía caer en dicho hueco. Esto era equivalente al proceso de aniquilación de un electrón y un protón. Análogamente, un electrón en el mar de Dirac podría absorber radiación, siendo excitado a un estado de energía positiva. En otras palabras, se crearían un electrón y un protón. Ambos tipos de procesos, creación y aniquilación de partículas, eran consistentes con el principio de equivalencia masa-energía de la relatividad. Sin embargo, ninguno de los procesos había sido observado nunca.

La segunda dificultad en la teoría de Dirac estaba relacionada con la enorme diferencia de masa entre el electrón y el protón. Recuérdese que el protón es aproximadamente dos mil veces más pesado que el electrón. Dirac era plenamente consciente de este problema y así lo señaló en su trabajo:

> ¿Puede la teoría presente explicar la gran asimetría existente entre electrones y protones? [...] Es evidente que la teoría de agujeros es consistente con un tratamiento simétrico de ambas partículas. [...] Sin embargo, dicha simetría no es matemáticamente perfecta cuando se tiene en cuenta la interacción entre los electrones y los protones. [...] Las consecuencias de esta asimetría no son fáciles de calcular en el contexto relativista, pero esperamos que sea posible encontrar una explicación de las diferentes masas del protón y electrón.

¿Por qué Dirac se empeñó en identificar los huecos de su teoría con los protones a pesar de ser consciente de las grandes dificultades que esta interpretación implicaba? La explicación la proporcionó él

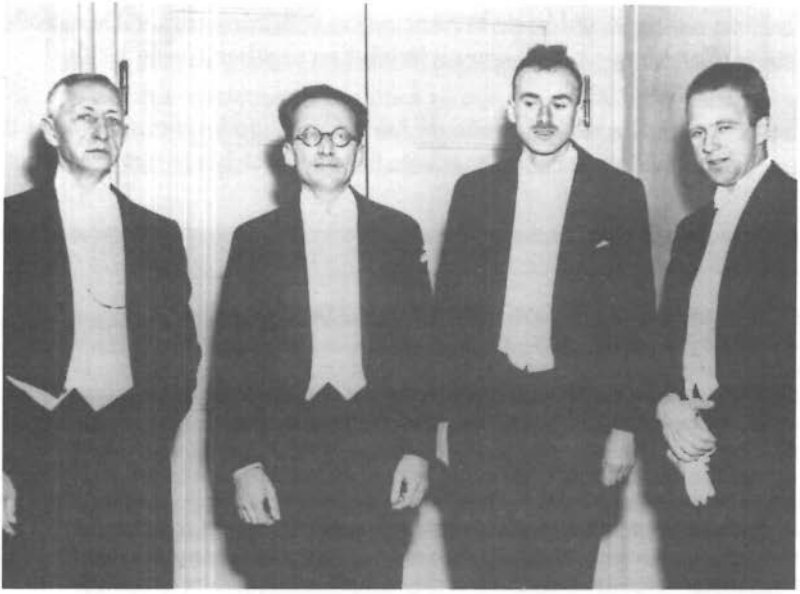
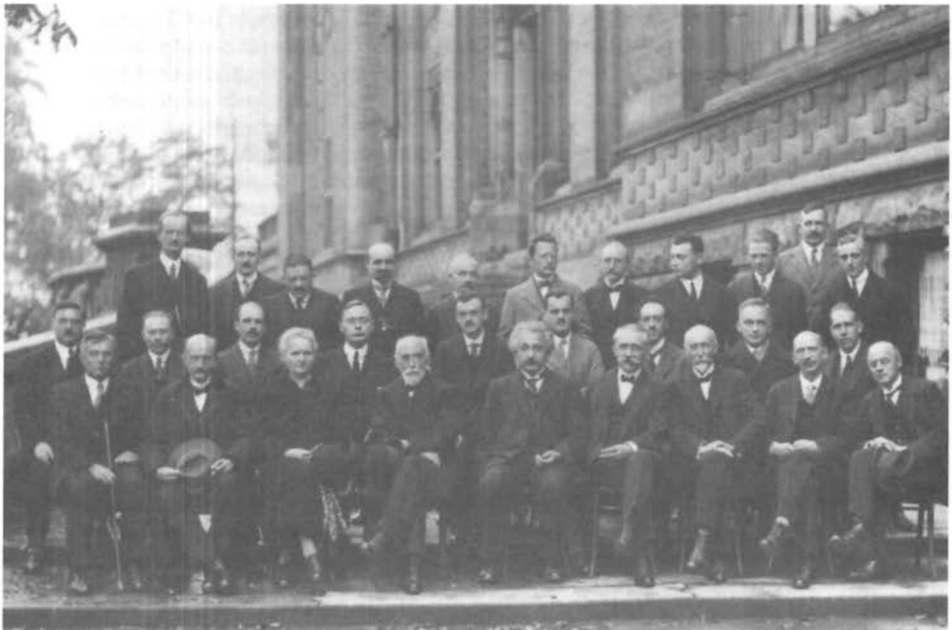


FOTO SUPERIOR:
Cuatro de los premiados con el Nobel en 1933; de izquierda a derecha, el escritor Iván Bunin y los físicos Schrödinger, Dirac y Heisenberg.

FOTO INFERIOR:
Una de las fotografías más famosas de la historia de la ciencia: los participantes en la conferencia Solvay de 1927. Dirac está justo en el centro.



mismo en una reunión de la Asociación Británica para el Desarrollo de la Ciencia que tuvo lugar en Bristol en septiembre de 1930:

> Siempre ha sido el sueño de los filósofos poder construir toda la materia a partir de una partícula fundamental; por lo tanto, no resul-

CREACIÓN Y ANIQUILACIÓN DE PARES EN LA TEORÍA DE DIRAC

El espectro energético resultante de la ecuación de Dirac se muestra en la figura 1. En la misma se observa un continuo de estados de energías positivas por encima de la energía propia del electrón, mc^2. Estos estados corresponden a electrones físicos con distintas energías cinéticas. Por otra parte, la ecuación de Dirac lleva implícito también el continuo de soluciones de energía negativa menores que $-mc^2$. Este continuo de estados es el denominado «mar de Dirac». El concepto de «vacío cuántico» corresponde a todos estos estados ocupados por electrones. De esta forma, Dirac explica la estabilidad de la materia haciendo uso del principio de exclusión de Pauli: no es posible ninguna transición de un estado físico con energía positiva a otro de energía

FIG. 1

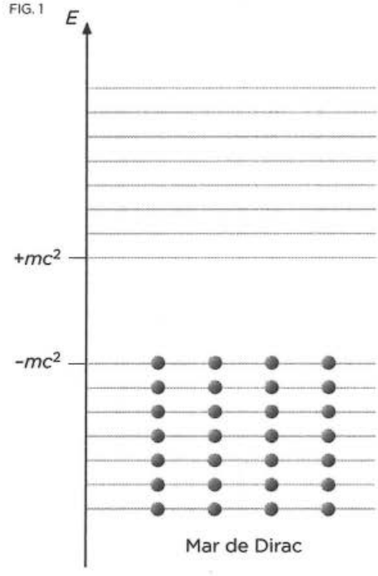
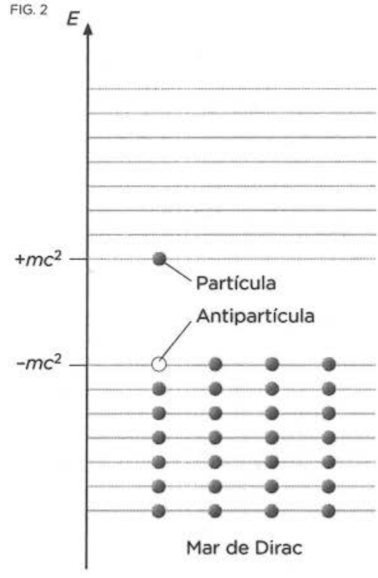


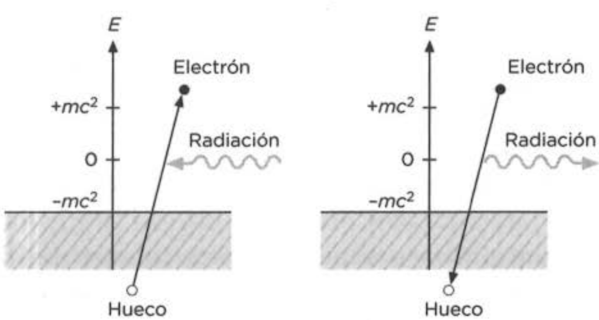
FIG. 2



ta completamente satisfactorio tener dos partículas, electrón y protón, en nuestra teoría. Existen, sin embargo, razones poderosas para pensar que electrones y protones no son entidades independientes, sino manifestaciones de un solo tipo de partícula. Esta conexión viene forzada por consideraciones de simetría de la carga eléctrica.

negativa al estar ya ocupado. El mar de Dirac corresponde a una situación completamente homogénea, sin ningún tipo de efecto observable a no ser que se produjese alguna alteración de dicha situación, por ejemplo, a través de la ausencia de alguno de los electrones en dicho mar (figura 2). La imagen de Dirac trae consigo la posibilidad de creación y aniquilación de partículas. ¿Cómo se interpretan dichos procesos en el contexto de la teoría de agujeros de Dirac? La presencia de un estado desocupado en el mar de Dirac permitiría que un electrón con energía positiva pudiese caer en el hueco desprendiéndose de la diferencia de energía a través de la emisión de radiación electromagnética. Identificando el hueco en el mar de Dirac como una partícula, el proceso se interpretaría como la aniquilación de un electrón y una partícula positiva dando lugar a radiación (panel derecho de la figura 3). Cuando Dirac identificó los huecos como antielectrones, el proceso señalado correspondía a la aniquilación de un par electrón/antielectrón. Por otra parte, también sería posible excitar el estado de vacío cuántico. Así, la presencia de radiación electromagnética podría arrancar un electrón del mar de Dirac y llevarlo a un estado en el continuo de energías positivas (panel izquierdo de la figura 3). Para ello, la energía proporcionada debe ser igual o superior a $2mc^2$, la anchura mínima de la zona prohibida que el electrón debe superar. En esta situación, el proceso daría lugar en el estado final a la creación de un hueco en el mar de Dirac, es decir, una partícula positiva: el antielectrón de Dirac, y un electrón. Ello se denomina «creación de pares partícula/antipartícula».

FIG. 3



EL ANTIELECTRÓN. EL MUNDO DE LAS ANTIPARTÍCULAS

En 1930 Dirac consideraba esencial disponer de una teoría física unitaria para el electrón y el protón, lo que se denominó «el sueño de los filósofos». Esta idea hizo que se empeñase en mantener a flote su teoría a pesar de las evidencias y los resultados, algunos desarrollados por él mismo, que mostraban claramente la inconsistencia de su interpretación de los protones. En febrero de 1930 el físico estadounidense Robert Oppenheimer (1904-1967) publicó un breve trabajo en el que mostraba que la vida media de un electrón atómico antes de desintegrarse con un protón, tal y como establecía la teoría de Dirac, era aproximadamente 10^{-9} segundos, lo cual era a todas luces absurdo, puesto que significaría que la materia no es estable. Oppenheimer concluyó que la teoría de Dirac necesitaba ser modificada: protones y electrones debían ser partículas diferentes.

Al mes siguiente, el propio Dirac envió a publicar el trabajo titulado: «Sobre la aniquilación de electrones y protones». En el mismo reconocía una vez más que la gran diferencia entre las masas de los electrones y protones constituía una seria dificultad. Dirac obtuvo una expresión para la probabilidad de aniquilación electrón-protón, mencionando:

> No podemos dar una interpretación numérica precisa de nuestro resultado puesto que no sabemos si la masa que aparece en la expresión se refiere a la del electrón o protón. En todo caso, el resultado obtenido es demasiado grande como para poder explicar la estabilidad de los electrones y protones.

Sin embargo, Dirac no dio su brazo a torcer, y concluía el trabajo con las siguientes palabras:

> Hemos de suponer que la interacción entre el electrón y el protón debe reducir muy apreciablemente el área de colisión. [...] Posiblemente para energías muy altas el resultado de este trabajo será preciso cuando la masa tenga el valor apropiado.

El físico ruso Ígor Tam llegó a la misma conclusión: la vida media de electrones y protones en los átomos en la teoría de Dirac era completamente inconsistente con la realidad. Al igual que Dirac y Oppenheimer, Tam pensaba que la inclusión de los efectos de interacción entre electrones y protones mejoraría los resultados. Tanto Oppenheimer como Tam fueron de los pocos físicos que aceptaron la teoría de huecos de Dirac. De ahí su empeño en mantener dicha teoría a pesar de los resultados absurdos que traía consigo.

Dirac persistió durante algunos meses en su interpretación del protón como un hueco en el mar de electrones de energía negativa. Sin embargo, también sabía perfectamente que muy pocos físicos compartían su opinión. El hipercrítico Pauli formuló lo que llegó a conocerse en los círculos internos de la física cuántica como el «segundo principio de Pauli»:

> En el momento en que un físico proponga una teoría, debe inmediatamente aplicarse al propio autor: así pues, Dirac debería ser aniquilado.

Durante el otoño de 1930 aparecieron nuevos trabajos que volvieron a cuestionar seriamente la interpretación de Dirac. Por una parte, Tam informó a Dirac:

> Pauli nos ha comentado que ha comprobado de forma rigurosa que, en el contexto de la teoría de huecos, la interacción entre los electrones y protones no puede destruir la igualdad entre las masas de los mismos.

Poco tiempo después, en noviembre de 1930, Weyl demostró con argumentos de simetría que el hueco en la teoría de Dirac debía tener necesariamente la misma masa que el electrón. El resultado de Weyl comenzó a minar la confianza de Dirac en su imagen del protón y su idea de una teoría unitaria. Dirac apreció especialmente las objeciones de Weyl porque consideraba que su forma de aproximarse a la física, a través del uso de las matemáticas, coincidía con su propia forma de trabajar. Refiriéndose a Weyl, Dirac escribió:

Weyl era un matemático, no un físico. Él analizaba las consecuencias matemáticas de una idea, desarrollando todo aquello que surgía de las diversas simetrías. De esta forma, Weyl llegó a la conclusión que los huecos debían tener exactamente la misma masa que los electrones. Weyl no realizó ningún comentario sobre las implicaciones físicas de tal resultado; quizá ni siquiera estuvo interesado en dichas implicaciones.

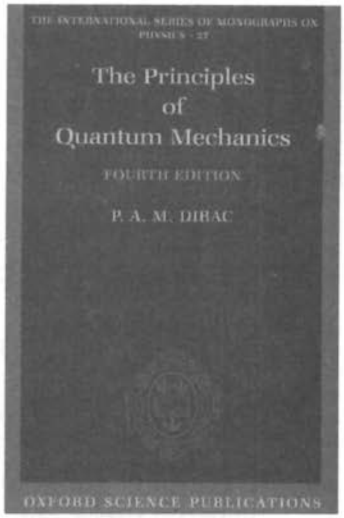
«Los teóricos deben concentrarse mucho más en los fundamentos matemáticos de su tema de investigación y mucho menos en las noticias de los laboratorios.»

— Paul Dirac.

A principios de 1931 Dirac aceptó la idea de Weyl y decidió abandonar su teoría unitaria del electrón y protón, aunque seguía manteniendo una confianza plena en la validez de la teoría general de agujeros y la existencia del mar de Dirac. En mayo de 1931 publicó un nuevo trabajo en el que presentó una versión diferente de su teoría de huecos con una hipótesis aún más atrevida: los huecos en el mar de electrones de energía negativa correspondían a unas partículas nuevas que aún no se habían detectado. El trabajo de Dirac de 1931 lleva por título «Singularidades cuantizadas en el campo electromagnético». En el mismo, Dirac escribió:

> Podemos suponer que en el mundo que conocemos todos los estados de energía negativa están ocupados por electrones. Un hueco, en el caso de existir, sería un nuevo tipo de partícula, desconocida para la física experimental, y que tendría la misma masa que el electrón pero carga opuesta. Podemos llamar a tal partícula antielectrón. No debemos esperar encontrarlos en la naturaleza debido a su rápida recombinación con los electrones; sin embargo, si pudiesen ser producidos experimentalmente en un estado de alto vacío, serían bastante estables y se podrían observar. Un encuentro entre dos rayos gamma de alta energía podría conducir a la creación de un par electrón antielectrón. La probabilidad de este tipo de proceso, con las intensidades actuales de rayos gamma, es despreciable.

«LOS PRINCIPIOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA»



En el verano de 1930 apareció la primera edición del libro de Dirac *Los principios de la mecánica cuántica*, que curiosamente fue publicado por la editorial Oxford University Press. El libro se convirtió inmediatamente en un éxito en el campo de la física cuántica, siendo particularmente popular la traducción que se realizó al ruso. Durante la década de 1930 fue el texto de referencia para toda la comunidad de física cuántica. Su estilo de escritura y su presentación seguían el patrón habitual de Dirac y lo que él mismo denominó el «método simbólico». La teoría general se presentaba con un lenguaje directo y preciso, y con una formulación matemática abstracta, sin mención apenas a observaciones empíricas ni cuestiones de interpretación física. El libro no seguía ninguna evolución histórica, no contenía ninguna ilustración y apenas tenía referencias o bibliografía. Desde el punto de vista pedagógico fue considerado desde el primer momento como un libro de texto excesivamente abstracto y difícil de seguir. La mayoría de los estudiantes lo consideraron muy inapropiado para comenzar a estudiar y entender los aspectos esenciales de la teoría cuántica. No solo los estudiantes manifestaron tal opinión. El propio Ehrenfest lo encontró «muy difícil de entender... Un libro terrible». Por el contrario, para Einstein el libro de Dirac era «la presentación lógica más perfecta hasta el momento de la mecánica cuántica». Pauli consideró el texto de Dirac como un gran logro y recomendó su estudio fervientemente, pero al mismo tiempo criticó claramente el método simbólico de Dirac señalando que «tenía el riesgo de que la teoría no tuviese relación aparente alguna con la realidad». El libro fue reeditado en diversas ocasiones, y en la edición de 1947 Dirac introdujo la famosa notación ket/bra que hoy forma parte de cualquier texto moderno de mecánica cuántica.

En este trabajo Dirac no solo postuló la existencia del antielectrón, sino que fue más allá y generalizó su argumento a otro tipo de partículas:

> Presumiblemente los protones tendrán también sus propios estados de energía negativa, todos ellos normalmente ocupados. Un hueco daría lugar a la aparición de un antiprotón.

En un par de párrafos, Dirac había propuesto la existencia de las antipartículas. Ahora bien, ¿era una simple conjetura desesperada de Dirac para mantener su teoría de huecos, o tenía algún viso de realidad?

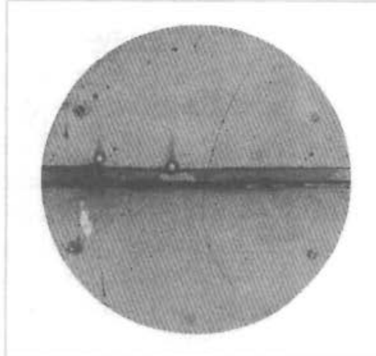
DESCUBRIMIENTO DEL POSITRÓN

Los rayos cósmicos (partículas cargadas) procedentes del espacio exterior se habían convertido en un interesante campo de estudio. De este modo, era uno de los principales proyectos de investigación de Robert A. Millikan y sus colaboradores en el Instituto Tecnológico de California (Caltech). En noviembre de 1931 Millikan impartió varios seminarios en el laboratorio Cavendish, en Cambridge, y mostró varias fotografías tomadas por Carl D. Anderson (1905-1991), antiguo estudiante suyo de doctorado, en las que se observaban las trayectorias dejadas en una cámara de niebla por electrones y ciertas partículas positivas.

El físico Patrick M.S. Blackett (1897-1974) se sintió inmediatamente fascinado por los resultados de Anderson y comenzó un proyecto de investigación sobre los rayos cósmicos en el laboratorio Cavendish. Sin embargo, los meses siguientes todo el protagonismo en Cambridge se lo llevó James Chadwick (1891-1974) y su descubrimiento del neutrón. Finalmente, tras doce años desde que Rutherford postulara su existencia, el neutrón se «observaba» en febrero de 1932.

En el verano de 1932 Anderson consiguió fotografiar la trayectoria de partículas que parecían corresponder, por un lado, a electrones, y por otro, a otras partículas de carga positiva que sufrían una deflexión similar a la de los electrones. Anderson publicó sus resultados en la revista *Science* mostrando una gran prudencia en la interpretación de los mismos. El artículo concluía con la si-

guiente frase: «Parece necesario considerar una partícula cargada positivamente y con una masa comparable a la del electrón». Sin embargo, el trabajo de Anderson pasó bastante desapercibido; además, en el mismo no se estableció ninguna relación con el hipotético antielectrón de Dirac.



La fotografía del positrón realizada por Carl D. Anderson con la cámara de niebla, un dispositivo lleno de gas y sometido a un campo magnético en el cual las partículas cargadas, al ionizar los átomos del gas, dejan señal de su trayectoria.

Por su parte, en Cambridge, Blackett y Giuseppe Occhialini (1907-1993) también obtuvieron resultados que corroboraron los de Anderson y que, además, identificaron directamente con los antielectrones de Dirac. En el trabajo que publicaron concluyeron:

> Parece no existir ninguna evidencia en contra de la validez de la teoría de Dirac; por el contrario, esta teoría predice un tiempo de vida para el electrón positivo suficientemente grande como para poder ser observado en la cámara de niebla, y al mismo tiempo, suficientemente corto como para explicar por qué no ha podido ser detectado por otros medios.

El nombre de «positrón» fue introducido por primera vez en un segundo trabajo de Anderson publicado en 1933. El descubrimiento experimental del positrón fue considerado como un gran triunfo para la teoría de Dirac. No obstante, muchos físicos siguieron manteniendo una posición muy crítica respecto a la imagen del mar de Dirac y la interpretación de una partícula como un hueco en dicho mar. Bohr escribió: «Incluso si todo este tema relacionado con el positrón resulta cierto, de algo estoy seguro: no tiene nada que ver con la teoría de huecos de Dirac». Pauli también mantuvo una clara diferenciación entre la partícula detectada por Anderson y el antielectrón de Dirac. En mayo de 1933, Pauli escribió a Dirac: «No creo en su percepción de los agujeros, incluso si la existencia del antielectrón es probada».

El escepticismo de Pauli y otros muchos físicos sobre la teoría de agujeros persistió durante algún tiempo. No era fácil aceptar la idea de un vacío formado por un infinito número de

electrones de energía negativa. Sin embargo, al mismo tiempo, era indudable que algunas consecuencias de dicha teoría —la existencia del antielectrón y su identificación con el electrón positivo observado por Anderson—se convirtieron en hechos incuestionables. Hubo de transcurrir algún tiempo para que la existencia de las antipartículas y los procesos de creación y aniquilación de pares partícula-antipartícula pudiesen explicarse sin necesidad de introducir el mar de Dirac.

HONORES MERECIDOS

La publicación de la teoría relativista del electrón convirtió a Dirac en uno de los físicos más renombrados del mundo. Su presencia en reuniones y congresos se hizo muy habitual, dado el gran interés que había suscitado su teoría. En los años siguientes este interés no hizo más que aumentar con la aparición de su teoría de agujeros y sus estudios sobre la interacción entre los fotones y los electrones. Sus viajes y estancias en diversos centros fueron muy frecuentes. Aparte de las principales instituciones de investigación en Europa (Copenhague, Gotinga, Leipzig, Leiden, etc.), visitó frecuentemente Estados Unidos y la Unión Soviética. En febrero de 1931 fue elegido miembro «externo» de la Academia de Ciencias de la URSS, siendo considerado oficialmente un «gran amigo» de la Unión Soviética. De hecho, fue uno de los pocos científicos occidentales a los que se permitió viajar a la URSS después de 1934-1935.

Dirac también recibió ofertas como profesor de prestigiosas universidades. En 1928, varios meses después de presentar su teoría del electrón, la Universidad de Mánchester le ofreció un puesto de profesor. Poco tiempo después, el físico americano Arthur Compton le pidió que ocupase una cátedra en la Universidad de Chicago. En los años siguientes, la oferta se extendió a muchos otros centros: Toronto, Princeton, Madison, etc. A pesar de la indudable mejora en las condiciones económicas asociadas a dichos puestos, Dirac decidió continuar en la Universidad de

Cambridge. En febrero de 1930 fue elegido *Fellow of the Royal Society*, una de las distinciones científicas de mayor prestigio en Gran Bretaña. El proceso de elección de miembros de la Royal Society generalmente implicaba varias nominaciones previas. La elección de Dirac fue extraordinaria: era la primera vez que su candidatura recibía una nominación y, además, fue elegido con solo veintisiete años, una edad mucho menor que la edad media de elección de la mayoría de miembros de la sociedad.

En julio de 1932 las autoridades de la Universidad de Cambridge anunciaron que Dirac sería el sucesor de Joseph Larmor en la Cátedra Lucasiana. El nombramiento de Dirac no constituyó sorpresa alguna para ninguno de sus colegas. Dirac era considerado uno de los físicos más brillantes del momento y, sin duda alguna, el más brillante de Gran Bretaña. Por dicha razón, se consideró natural que ocupase la cátedra más importante del país, y una de las más prestigiosas del mundo. La Cátedra Lucasiana había sido ocupada en el siglo XVII por el gran Isaac Newton durante más de treinta años. Dirac la ocuparía durante treinta y siete años. Otra analogía entre ambos físicos es que el nombramiento de Dirac tuvo lugar con treinta años recién cumplidos, solo unos meses más de la edad que tenía Newton cuando ocupó la cátedra. En la actualidad, el profesor en la cátedra es Stephen Hawking.

La mayor recompensa en ciencia, el premio Nobel, le fue concedido en 1933. Cuando en noviembre de 1933 se hizo público el nombre de los tres premiados, Dirac se sorprendió de estar entre ellos, no así, de los otros dos: Heisenberg, que recibió en solitario el premio Nobel correspondiente a 1932, y Schrödinger que compartió el de 1933 con el propio Dirac. Dirac consiguió el premio Nobel con treinta y un años recién cumplidos, convirtiéndose en el físico teórico más joven en la historia en conseguir tal recompensa. Tiempo después, cuando las nominaciones recibidas por cada uno de los premiados se hicieron públicas, se pudo apreciar que Dirac fue muy afortunado en conseguir el premio Nobel en 1933. Solo había recibido dos nominaciones, en contraste por ejemplo con las once que había recibido Schrödinger. El premio Nobel le fue concedido a Dirac por «su descubrimiento de nuevas y fértiles formas de la teoría atómica y sus aplicaciones».

El memorándum sobre Dirac para el comité de los premios Nobel fue escrito por el físico Carl Wilhelm Oseen, amigo personal de Niels Bohr. En el mismo, Oseen se mostró muy crítico con el trabajo de Dirac y, aun reconociendo su valía y originalidad, lo consideró claramente menos fundamental que el desarrollado por otros físicos, como Heisenberg, Einstein, Planck o el mismo Bohr. Sin lugar a dudas, Oseen fue incapaz de apreciar en aquellos momentos el carácter revolucionario de las teorías de Dirac. Ningún otro investigador tendría más influencia en el desarrollo de la física durante las décadas siguientes.

El discurso de Dirac en la gala de los premios Nobel versó sobre «La teoría de electrones y positrones». Habló de sus antielectrones y también de los antiprotones, y concluyó con las siguientes palabras:

> Debemos considerar un accidente que la Tierra (y presumiblemente todo el sistema solar) esté formado básicamente por electrones negativos y protones positivos. Es bastante posible que para algunas estrellas la situación sea la inversa, es decir, estén constituidas por positrones y antiprotones. De hecho, debe existir la mitad de estrellas de cada tipo. Las dos clases de estrellas tienen exactamente el mismo espectro, y no hay forma de distinguirlas a través de los métodos astronómicos actuales.

Dirac puso delante de nuestros ojos un universo donde materia y antimateria eran parte esencial del mismo. ¿Realidad o ficción?

CAPÍTULO 4

La electrodinámica cuántica

Desde el mismo nacimiento de la mecánica cuántica numerosos científicos, Dirac entre ellos, intentaron describir el campo electromagnético y la interacción entre partículas en el marco de la nueva teoría. Con el paso de los años, la electrodinámica cuántica se convirtió en la teoría física más precisa. Dirac está considerado como su «fundador», pero para él también constituyó el mayor desengaño de su vida científica, ya que nunca pudo aceptar la forma en la que se eliminaban los resultados infinitos que surgían de la teoría.

Existe una famosa fotografía (véase la página 123) en la que aparecen Dirac y el físico estadounidense Richard Feynman (1918-1988) enfrascados en una discusión. En realidad, lo que muestra la fotografía es a Feynman gesticulando frente a Dirac. No sabemos qué le está diciendo; quizá está intentando convencerle de algún último descubrimiento en el mundo subatómico. La fotografía es ilustrativa del carácter de ambos personajes; Feynman, extrovertido y hablador; Dirac, por el contrario, muy reservado y de pocas palabras. Podemos imaginar la historia de la fotografía como sigue: Feynman está utilizando sus conocimientos y su capacidad de persuasión para convencer a Dirac de la consistencia de la electrodinámica cuántica, la joya de la física en palabras del propio Feynman. Dirac, por el contrario, mantiene una postura de aparente indiferencia y desinterés, convencido de que lo mejor que le podía suceder a la física es que desapareciese la electrodinámica cuántica tal y como estaba formulada. Años antes había escrito:

> La única parte importante de la física teórica que hemos de abandonar es la electrodinámica cuántica. [...] Debemos dejarla sin ningún tipo de objeción. [...] De hecho, debido a su extrema complejidad, muchos físicos estarán encantados de ver el final de esta teoría.

¿Cómo es posible que Dirac, a quien se considera fundador de la electrodinámica cuántica y, con seguridad, el físico que mayor influencia tuvo en la posterior formulación de la teoría tal y como ahora se conoce, llegase a tal conclusión?

LOS TRABAJOS PIONEROS

En los años previos a 1925 numerosos físicos eran ya conscientes de la necesidad de desarrollar una descripción cuántica de la radiación electromagnética y de explicar cómo esta radiación interaccionaba con la materia. Se sabía que los átomos emitían y absorbían radiación; es decir, los fotones se producían y desaparecían continuamente. ¿Cómo describir estos procesos? Einstein introdujo en 1917 los coeficientes de probabilidad asociados a procesos de emisión y absorción de radiación, y encontró una relación sencilla entre los mismos, pero fue incapaz de calcularlos a partir de la teoría cuántica existente en aquellos momentos. En sus propias palabras: «Ello requeriría una teoría exacta de la electrodinámica y la mecánica», teoría que aún no se había desarrollado.

La irrupción de la mecánica cuántica con el trabajo seminal de Heisenberg marca el punto de partida para intentar resolver el problema planteado por Einstein. El primero en trabajar intensamente en la búsqueda de una teoría cuántica del campo electromagnético fue Pascual Jordan quien consiguió explicar algunos resultados previos obtenidos por Einstein, pero fue incapaz de describir los coeficientes de absorción y emisión. Para ello, era imprescindible disponer de una teoría de la interacción entre la radiación y la materia. Dicha teoría fue desarrollada por Dirac en febrero de 1927, considerándose desde entonces el trabajo fundacional de la electrodinámica cuántica (conocida como QED por sus siglas en inglés: *Quantum ElectroDynamics*). La electrodinámica cuántica es la teoría cuántica que describe el comportamiento e interacción de los electrones y/o positrones entre sí, y de estos con los fotones.

El trabajo de Dirac llevó por título «La teoría cuántica de la emisión y absorción de radiación», y fue completado durante su

primera estancia en Copenhague (1927). Muchos años después, Dirac mencionó:

> El origen de ese trabajo fue simplemente el juego con las ecuaciones. En aquellos momentos pretendía desarrollar una teoría de la radiación, y comencé a jugar con la ecuación de Schrödinger. Se me ocurrió la idea de aplicar las reglas de cuantización a la propia función de onda como si fuese un número-q. Encontré que se obtenía la estadística de Bose-Einstein.

En la introducción de su trabajo, Dirac planteaba claramente el problema:

> La nueva teoría cuántica puede tratar matemáticamente el problema de cualquier sistema dinámico formado por un número dado de partículas con fuerzas instantáneas actuando entre ellas. [...] Por el contrario, nada se conoce hasta el momento sobre el correcto tratamiento de un sistema en el que las fuerzas se propaguen con la velocidad de la luz, ni sobre el campo electromagnético producido por un electrón en movimiento, ni sobre la reacción que este campo produce sobre el propio electrón. [...] Sin embargo, parece posible construir una teoría satisfactoria para la emisión de radiación y el efecto de esta sobre el propio sistema.

¿Qué camino siguió Dirac para construir dicha teoría? El procedimiento fue «cuantizar» el campo electromagnético y estudiar la interacción de este (los fotones) con los electrones. Dirac presentó el problema desde una doble perspectiva: corpuscular y ondulatoria. En el primer caso, la radiación se describía como un conjunto de partículas moviéndose a la velocidad de la luz que no interaccionaban entre sí y que satisfacían la estadística de Bose-Einstein. La segunda aproximación consistió en describir la radiación electromagnética haciendo uso de un potencial de tipo vector y desarrollando la función de onda en sus componentes de Fourier. Ambas aproximaciones proporcionaban idénticos resultados. El trabajo de Dirac tuvo un gran impacto en los físicos de su época. Por primera vez se desarrollaba una descripción consistente de

EL ESTADO CERO

En la formulación original de su trabajo «La teoría cuántica de la emisión y absorción de radiación» Dirac introdujo un estado vacío, llamado «estado cero», constituido por una infinidad de fotones de energía y momento nulos (sin ningún efecto observable). De esta forma, los operadores de creación y destrucción producirían la creación o aniquilación de fotones reales que podrían detectarse en un caso, o desaparecerían en el estado cero en otro. Con esta imagen, Dirac construyó el hamiltoniano que describía la interacción entre un fotón y el átomo, y pudo calcular las probabilidades de emisión y absorción: «Cuando un cuanto de luz es absorbido puede considerarse que ha realizado un salto al estado cero, y cuando es emitido puede interpretarse como una transición del estado cero a un estado físico, es decir, parece como si hubiese sido creado. No existe limitación en el número de cuantos que pueden crearse o destruirse, puesto que podemos suponer que existe un número infinito de fotones en el estado cero». Es interesante mencionar que esta interpretación del estado cero de fotones es conceptualmente similar a la imagen de la teoría de agujeros que Dirac introdujo algunos años más tarde en relación a la ecuación relativista del electrón (véase el capítulo 3).

los «cuantos» de luz a partir de los principios básicos de la recién descubierta mecánica cuántica. El trabajo de Dirac constituyó la primera teoría cuántica del campo electromagnético y, además, explicaba los procesos de emisión y absorción de luz por la materia. Dirac desarrolló todo un formalismo matemático preciso para describir los procesos mencionados, introduciendo conceptos como «segunda cuantización» y «operadores de creación y destrucción». Estos conceptos hoy día resultan imprescindibles en la propia construcción de la teoría cuántica de la radiación.

LAS LLAMADAS «CORRECCIONES RADIATIVAS»

Dirac pudo describir con su teoría los procesos de emisión y absorción de radiación electromagnética por la materia; sin embargo, también señaló:

> Procesos radiativos de tipo más general, en los cuales varios cuantos de luz intervienen simultáneamente, no están permitidos por la teoría.

Realmente, la teoría de Dirac sí permitía tales procesos, pero era necesario incluir en el cálculo términos de orden superior. Es importante señalar que en la mayoría de problemas, en particular, en el caso de la interacción radiación-materia, no es posible resolver exactamente la ecuación de Schrödinger; por el contrario, hay que hacer uso de métodos aproximados, como el denominado «método de perturbaciones». Este consiste en considerar que la intensidad de la interacción entre la radiación y el átomo es mucho menor que las energías propias del sistema considerado (el átomo); de este modo, la interacción radiación-materia puede considerarse como una pequeña perturbación del sistema bajo estudio.

El método de perturbaciones, que puede considerarse similar al procedimiento en matemáticas en el que una función se desarrolla en potencias sucesivas de un pequeño parámetro, permite resolver de forma práctica infinidad de problemas, pero el precio a pagar es que el resultado es siempre aproximado, tanto mejor cuantos más términos se consideran en el desarrollo y cuanto menor sea el valor del parámetro en el que se realiza el desarrollo. En el caso de la interacción electromagnética, el parámetro que define el cálculo perturbativo, es decir, las contribuciones que van apareciendo en los distintos órdenes del desarrollo, es la constante de estructura fina:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} \cong \frac{1}{137}.$$

Dirac incluyó términos de segundo orden en su teoría de la interacción radiación-materia y completó el trabajo titulado «Teoría cuántica de la dispersión» durante su estancia en Gotinga. En el mismo, Dirac introdujo conceptos que tendrían una gran importancia en el posterior desarrollo de la teoría cuántica de la radiación. Así, escribió:

> La radiación que ha sido dispersada puede aparecer a través de un proceso doble en el cual un tercer estado, llamémosle n, con una

energía propia diferente al estado inicial m', y final, m, interviene. [...] La radiación dispersada surge como resultado de dos procesos: $m' \rightarrow n$ y $n \rightarrow m$; uno de ellos corresponde a un proceso de absorción, y el otro, a uno de emisión, en ninguno de los cuales la energía total propia es conservada.

En las líneas citadas aparece lo que posteriormente recibiría el nombre de «partículas virtuales», concepto esencial para explicar y entender cómo interaccionan las partículas entre sí, y cuya existencia está permitida por el principio de incertidumbre de Heisenberg. El segundo aspecto inesperado con el que Dirac se encontró fue la aparición de integrales divergentes que producían resultados infinitos.

Dirac mantuvo en aquel momento una postura bastante pragmática, indicando que tal «dificultad no se debía a ningún error fundamental en la teoría, sino a las aproximaciones consideradas». El hecho de que los resultados infinitos apareciesen solo en el cálculo de términos de orden superior, y no en primer orden, indicaba que las aproximaciones consideradas en la descripción del sistema físico no eran razonables. Dirac estaba convencido de que una teoría más precisa traería consigo resultados finitos. Como se verá más adelante, la dificultad de los infinitos persistió durante muchos años, y constituyó para Dirac el mayor desengaño de su vida científica.

LA VISIÓN «ALEMANA» Y LAS CRÍTICAS DE DIRAC

Dirac consideraba la discontinuidad de la materia como una propiedad primaria y, por consiguiente, creía que las partículas constituían las entidades fundamentales en la teoría cuántica. Por el contrario, para Jordan y sus colegas alemanes el concepto primario era el de campo; de esta manera, las partículas conocidas surgían a partir de un proceso de «cuantización» de los correspondientes campos clásicos. Jordan y sus colaboradores extendieron el procedimiento de «segunda cuantización» aplicándolo no solo





FOTO SUPERIOR:
Los participantes en el congreso Solvay de 1933. Dirac está de pie y es el noveno empezando por la izquierda.

FOTO INFERIOR:
Dirac, en el centro, junto a los físicos Robert Oppenheimer, a la izquierda, y Abraham Pais.

al campo electromagnético (como había hecho el propio Dirac), sino a todo tipo de partículas y campos.

Estos trabajos, que Jordan llegó a considerar como su contribución más importante a la física teórica, establecieron las bases de lo que unos años después se denominaría «teoría cuántica de campos».

Jordan, Klein y Wigner publicaron varios trabajos aplicando el método de segunda cuantización a partículas de espín semientero, como los electrones y protones. Estos trabajos fueron criticados por Dirac, considerando que:

> La teoría de Jordan era bastante artificial, y, con el fin de conseguir el resultado deseado, se hacía uso de un método muy peculiar para la cuantización del campo.

El siguiente paso importante en la teoría cuántica de la radiación se produjo en 1929-1930 con la publicación de dos trabajos realizados por Heisenberg y Pauli. El punto de partida de los mismos fue la teoría desarrollada por Jordan, y el objetivo planteado no podía ser más ambicioso: «Una formulación invariante relativista general de la interacción electrodinámica de las partículas». La teoría de Heisenberg y Pauli incorporaba una descripción unitaria del campo electromagnético y de los campos asociados al electrón y el protón, haciendo uso, además, de la recién descubierta ecuación de Dirac.

Sin embargo, la nueva teoría seguía conteniendo divergencias que aparecían al calcular la autoenergía de las partículas cargadas (la energía adquirida por las partículas debido a la interacción con el campo eléctrico que ellas mismas producían). Jordan criticó el trabajo de Heisenberg y Pauli afirmando que aportaba pocas novedades respecto a sus trabajos previos, y mostró una visión muy pesimista respecto al problema de los resultados infinitos de la teoría:

> La autoenergía del electrón es una cantidad infinita y, por consiguiente, representa tal dificultad que resulta imposible seguir avanzando en las aplicaciones prácticas.

RICHARD FEYNMAN Y EL FORMALISMO «LAGRANGIANO» DE DIRAC

En 1933 Dirac aplicó el formalismo «lagrangiano», ampliamente usado en la mecánica clásica, al mundo cuántico. Dirac justificó su estudio señalando que el método del lagrangiano resultaba en algunos aspectos más fundamental que el análisis basado en el uso del hamiltoniano. Las ecuaciones de movimiento se obtienen directamente a partir del principio de mínima acción; por otra parte, el lagrangiano puede expresarse fácilmente en forma relativista. El trabajo de Dirac, titulado «El lagrangiano en mecánica cuántica», apareció publicado en una revista soviética y pasó completamente desapercibido durante muchos años, hasta que Richard Feynman, trabajando en su tesis doctoral, lo redescubrió a mediados de 1941. El trabajo de Dirac fue toda una revelación para el físico estadounidense. A partir del mismo, Feynman desarrolló una nueva formulación de la mecánica cuántica: la denominada «formulación de integrales de camino». Feynman consideraba a Dirac como uno de los físicos más brillantes y agudos, y siempre sintió una especial admiración por él, incluso cuando la visión de Dirac sobre la electrodinámica cuántica era absolutamente negativa. Refiriéndose a ambos físicos, Wigner admitió que podía considerarse a Feynman como «un segundo Dirac, pero esta vez humano».



Richard Feynman (a la derecha) conversando con Dirac.

Jordan no pudo superar esta sensación de frustración y al poco tiempo decidió abandonar el estudio de la interacción radiación-materia. Algunos años después abandonaría incluso la física. Dirac también criticó severamente el trabajo de Heisenberg y Pauli señalando que:

> Se realizaban tantas aproximaciones que todos los aspectos procedentes de la relatividad especial desaparecían, de modo que los resultados mostrados en el trabajo podían obtenerse por medio de una teoría no relativista mucho más simple.

En 1932 Dirac publicó dos trabajos en los que expresaba más claramente sus objeciones a la teoría de Heisenberg y Pauli. El primero, escrito en solitario, tiene el título general de «Mecánica cuántica relativista». En él, Dirac critica el procedimiento metodológico seguido por Heisenberg y Pauli, y señala:

> Si uno desea realizar una observación de un sistema de partículas en interacción, el único procedimiento efectivo es someter dichas partículas a un campo de radiación electromagnética y ver cómo reaccionan. Así pues, el papel del campo es proporcionar un medio para realizar observaciones. La verdadera naturaleza de una observación requiere una estrecha relación entre el campo y las partículas. Por consiguiente, no podemos considerar al campo como un sistema dinámico similar al de las partículas, tal y como se adopta en el trabajo de Heisenberg y Pauli.

En el segundo trabajo, realizado en colaboración con Vladimir Fock (1898-1974) y Boris Podolski (1896-1966), y titulado «Sobre la electrodinámica cuántica», los autores extendieron la teoría previa y presentaron una formulación invariante relativista de las ecuaciones fundamentales de la electrodinámica cuántica. Además, mostraron la equivalencia entre esta teoría y la previa desarrollada por Heisenberg y Pauli; resultado ya obtenido unos meses antes por Léon Rosenfeld (1904-1974).

El primer trabajo de Dirac recibió críticas muy duras por parte de los físicos alemanes. Los comentarios de Pauli fueron demoledores:

> Su nuevo trabajo, por decirlo gentilmente, no es ninguna obra maestra. Tras una muy confusa y desordenada introducción llena de frases que solo resultan medio entendibles, termina con un ejemplo unidimensional excesivamente simple, cuyos resultados son idénti-

cos a los obtenidos con la teoría desarrollada por Heisenberg y yo mismo hace unos años.

Por el contrario, el segundo trabajo (en colaboración con Fock y Podolski) fue bien recibido por Pauli que destacó «la elegancia matemática desarrollada por los autores en la formulación invariante relativista de la teoría».

El impacto real de los dos trabajos de Dirac solo se puso de manifiesto años después, en la década de 1940, cuando sirvieron de inspiración para el trabajo desarrollado por dos de los fundadores de la moderna electrodinámica cuántica: el físico japonés Sin-Itoro Tomonaga (1906-1979), que refiriéndose al primer trabajo de Dirac señaló: «Atrajo mi interés por la novedad de su filosofía y la belleza de su forma»; y el físico estadounidense Julian Schwinger (1918-1994), que se sintió atraído, desde muy joven, por los resultados y la formulación del trabajo de Dirac, Fock y Podolski. La influencia de Dirac también se dejó sentir sobre el tercer fundador de la moderna electrodinámica cuántica, el físico estadounidense Richard Feynman.

LA TEORÍA DEL POSITRÓN

La formulación de la teoría de agujeros de Dirac con el postulado de los antielectrones, y el posterior descubrimiento del positrón, fueron momentos decisivos en el desarrollo de la electrodinámica cuántica. El proceso de creación/aniquilación de pares de partícula/antipartícula se convirtió en la forma natural de explicar la interacción de los fotones con la materia. El principio de equivalencia masa-energía y el principio de incertidumbre de Heisenberg proporcionaban el marco adecuado en el cual la energía asociada a un campo electromagnético podía transformarse en materia, y a la inversa.

Resulta natural, pues, que el físico que había postulado la existencia de la antimateria realizase un nuevo intento de formular la teoría cuántica de la radiación. Dirac presentó su nuevo

trabajo, titulado «Teoría del positrón», en el contexto del congreso Solvay que tuvo lugar en Bruselas en octubre de 1933. Poco después de la celebración de esta conferencia científica, elaboró con más profundidad su teoría con una formulación matemática detallada. Este nuevo trabajo fue publicado a principios de 1934 con el título «Discusión de la distribución infinita de electrones en la teoría de los positrones».

Dirac era muy consciente de las grandes dificultades de la electrodinámica cuántica, con los resultados infinitos asociados al cálculo de la energía propia del electrón. La incorporación del positrón en la teoría cuántica de la radiación no resolvió el problema del valor infinito para la autoenergía. Además, surgieron nuevos e inesperados efectos, como la polarización del vacío, que trajeron consigo nuevas dificultades. Dirac concluía su informe al congreso Solvay con la siguiente afirmación:

> Como resultado de los cálculos realizados, parece que las cargas eléctricas que uno observa ordinariamente para los electrones, protones y otras partículas no son las cargas reales que estas partículas poseen (las que aparecen en las ecuaciones fundamentales), sino que son ligeramente menores.

El significado físico de estos nuevos conceptos puede apreciarse mejor en la carta que Dirac envió a Bohr semanas antes de que empezase el congreso Solvay:

> En los últimos meses, Peierls y yo hemos estado trabajando en la posible modificación producida por un campo eléctrico estático sobre la distribución de electrones de energía negativa. Hemos observado que esta distribución produce una neutralización parcial de la carga que origina el campo. [...] Si despreciamos la perturbación que el campo produce sobre el mar de electrones de energía negativa con energías menores que $-137mc^2$, la neutralización de la carga es pequeña, del orden de 1/137. Así pues, concluimos que todas las partículas cargadas de la física, electrones, protones, núcleos atómicos, etc., tienen cargas efectivas ligeramente menores que sus cargas reales. [...] La carga efectiva es lo que realmente se mide en cualquier experimento

a baja energía; [...] el valor real es ligeramente superior. [...] Así pues, debemos esperar pequeñas alteraciones en la fórmula de dispersión de Rutherford, en la fórmula de Klein-Nishima, en la expresión de Sommerfeld de la constante de estructura fina, etcétera.

En el texto citado, Dirac introduce conceptos que forman parte del lenguaje actual de las «teorías cuánticas de campos». La carga efectiva de Dirac es la denominada hoy «carga física»; la carga real se denota como «carga desnuda», y la perturbación que el campo produce en el mar de electrones de energía negativa corresponde al proceso conocido como «polarización del vacío».

«El único objetivo de la física teórica es calcular resultados que se puedan comparar con la experiencia. [...] Es totalmente innecesario que deba darse una descripción satisfactoria del curso completo de los fenómenos.»

— Paul Dirac.

Dirac realizó un primer cálculo de la modificación de la carga debido a la presencia del mar de Dirac. Una vez más, aparecían integrales divergentes. Dirac hizo frente a este problema introduciendo diversas técnicas matemáticas que le permitían eliminar las divergencias. Este tipo de procedimiento constituye la base de lo que años después, a finales de la década de 1940, se denominarían «técnicas de renormalización» —que en el siguiente apartado son explicadas con mayor detalle— y permitirían la reformulación de la electrodinámica cuántica, convirtiéndola en la teoría física más precisa.

La nueva teoría de Dirac fue acogida con grandes reservas y sometida a fuertes críticas por sus colegas. Pauli consideró las ideas de Dirac «artificiales, matemáticamente muy complicadas, y sin sentido físico». El normalmente comedido Heisenberg fue en este caso incluso más severo que Pauli, calificando la teoría de absurda. A pesar de ello, el concepto que introdujo Dirac sobre la polarización del vacío se mantuvo y, muy pronto, otros físicos comenzaron a estudiar este nuevo efecto.

El estado general de ánimo de la comunidad científica era de perplejidad, y sobre todo, de una enorme frustración. El propio Dirac se mostraba cada vez más escéptico y, en el fondo, su opinión no era tan diferente a la mostrada por Heisenberg y Pauli. Había intentado resolver el problema de los infinitos haciendo uso de complicadas y «artificiales» técnicas matemáticas, algo que iba en contra de lo que empezaba a convertirse en uno de sus principios más arraigados: «La belleza matemática en la física». En los años siguientes su desencanto sería tal que llegaría más lejos que ninguno de sus colegas en la crítica de la nueva electrodinámica cuántica.

EL PROBLEMA DE LOS «INFINITOS» Y LA «RENORMALIZACIÓN»

La dificultad de resultados infinitos o integrales divergentes surgió ya en el siglo XIX en el contexto de la teoría electromagnética de Maxwell. Una partícula cargada eléctricamente produce un campo alrededor de sí misma. Este campo produce a su vez una energía electromagnética que modifica la propia masa de la partícula (se denomina «energía propia» o «autoenergía»). Dicha energía es inversamente proporcional a la distancia entre la posición de la partícula cargada y la posición donde se evalúa el campo. La dificultad surge ante la siguiente pregunta: ¿qué energía produce el campo eléctrico generado por la partícula en su propia posición? La distancia sería cero y el resultado infinito. Desde el punto de vista clásico, la dificultad se resuelve considerando que la partícula tiene una cierta estructura y una extensión finita estando la carga distribuida sobre su superficie. De esta forma, la energía producida por el campo sería inversamente proporcional al radio que determina la extensión de la partícula.

En la teoría cuántica la imagen de un electrón con extensión espacial es insostenible; al contrario, el electrón es una partícula elemental, sin estructura interna. La descripción cuántica del campo eléctrico generado por el electrón viene dada como la posi-

bilidad de emisión y absorción de fotones virtuales, cuya existencia está permitida por el principio de incertidumbre de Heisenberg. Este proceso se representa en la figura 1. Estos tipos de gráficos se denominan «diagramas de Feynman». En un instante dado, el electrón, que es representado por la línea continua, emite un fotón que después es reabsorbido por el propio electrón (representado como un bucle con línea ondulada). La evaluación de este proceso, el denominado «problema de la autoenergía del electrón», conduce a integrales divergentes. Nótese que el proceso previo corresponde al caso más simple, con la emisión y reabsorción de un solo fotón. Se pueden considerar procesos mucho más complicados aumentando el número de fotones virtuales involucrados.

La combinación del principio de incertidumbre y el principio de equivalencia masa-energía es esencial para entender el concepto de vacío cuántico. En el mismo, se producen continuamente fluctuaciones cuánticas que pueden dar lugar a producción de pares partícula/antipartícula virtuales. El concepto de polarización del vacío, introducido por Dirac, está relacionado directa-

FIG. 1



FIG. 2

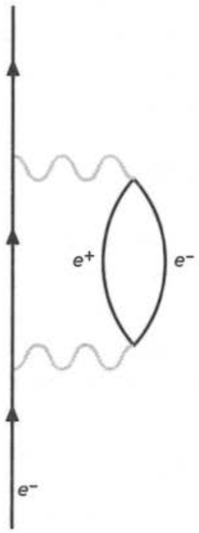
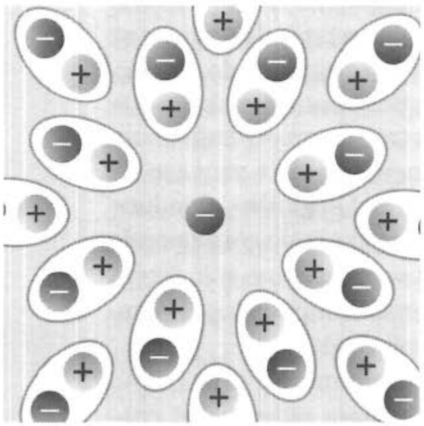


FIG. 3



mente con estos pares virtuales. Considérese de nuevo el caso de un electrón que emite y reabsorbe continuamente fotones virtuales, los cuales a su vez pueden crear pares virtuales electrón/positrón. Los positrones tenderán a aproximarse al electrón físico, mientras que los electrones virtuales tenderán a alejarse (tal y como muestra la figura 2).

De nuevo, existe una infinidad de diagramas compatibles con este proceso, y el resultado del mismo es que la carga del electrón se ve parcialmente neutralizada por la «nube» de positrones virtuales situados a su alrededor (figura 3).

La contribución de los diagramas mostrados en las figuras previas puede calcularse produciendo resultados infinitos cuando la distancia tiende a cero. Es importante mencionar que el análisis de distancias cada vez menores es equivalente a considerar energías cada vez mayores y, por tanto, una infinidad de procesos más y más complejos pueden contribuir de modo significativo tanto en la energía como en la masa del electrón.

La solución al problema de los resultados infinitos comenzó a vislumbrarse a finales de la década de 1930 con los trabajos de Hendrik A. Kramers (1894-1952). La idea fundamental es la siguiente: en la teoría cuántica solo las cantidades que pueden medirse tienen sentido; en otras palabras, las cantidades que no pueden medirse no tienen por qué estar bien definidas, es decir, pueden ser indeterminadas. Así pues, la masa y la carga de un electrón observadas en el laboratorio son aquellas que corresponden a un electrón real, es decir, un electrón emitiendo y reabsorbiendo fotones virtuales, y polarizando continuamente el vacío. Por el contrario, las magnitudes que aparecen en las ecuaciones de la electrodinámica cuántica son las correspondientes a la masa

y carga de electrones «que no sienten interacción» (se denominan habitualmente electrones «ideales» o «desnudos»). El problema es que estas magnitudes de electrones «ideales» (m_0, e_0) pueden ser indeterminadas (infinitas), puesto que corresponden a una situación no física. Un electrón real nunca está libre de interacción; incluso si se encuentra aislado interacciona consigo mismo emitiendo y reabsorbiendo fotones.

A finales de la década de 1940 Feynman, Schwinger y Tomonaga desarrollaron técnicas matemáticas para poder obtener resultados no ambiguos. Estas técnicas se conocen como «procedimientos de renormalización», y en ellas se establece una relación entre los valores medidos en el laboratorio para la masa y carga del electrón y los «posibles» valores correspondientes al electrón «desnudo». Esta relación viene dada a través de las denominadas «constantes de renormalización».

¿Cómo determinar estas constantes para que los resultados físicos resulten no ambiguos? El procedimiento desarrollado por Richard Feynman (que no es el único que se ha elaborado) fue introducir una cierta distancia mínima de corte en la resolución de las diversas integrales, de manera que el resultado de las mismas y, por consiguiente, los valores del electrón «desnudo» fuesen finitos. El problema es que dichos valores dependen apreciablemente del valor específico elegido para la distancia de corte. En otras palabras, las propiedades del electrón «desnudo» siguen siendo indeterminadas.

Lo realmente interesante del proceso fue comprobar que dichos valores «desnudos», totalmente dependientes de la distancia de corte usada, conducían siempre a resultados físicos coherentes para diversas propiedades del electrón, siempre y cuando el cálculo de dichas propiedades físicas incluyese todas las contribuciones que se habían considerado previamente en la determinación de los valores «desnudos». En otras palabras, la distancia de corte solo influía en la determinación de los valores «desnudos»: números teóricos que no pueden ser directamente observados. En todo caso, a pesar de los éxitos indiscutibles de la electrodinámica cuántica, el propio Feynman se refirió al procedimiento de renormalización como «un proceso chiflado».

AÑOS DE DESENCANTO Y DESENGAÑO

En 1934, el mismo año en que Dirac publicó su trabajo sobre la teoría del positrón, Oppenheimer y otros físicos desarrollaron una nueva versión de la teoría de electrones y positrones en la que no hacía falta realizar ninguna mención al mar de Dirac. Pauli, el mayor crítico de la teoría de agujeros de Dirac, y su estudiante Viki Weisskopf (1908-2002) desarrollaron ese mismo año el proceso de cuantización del campo de Klein-Gordon. Su trabajo mostró que la existencia de pares partícula-antipartícula se producía también en el caso de bosones (partículas de espín entero). Pauli denominó su trabajo como la «teoría anti-Dirac».

Sin embargo, la presencia de resultados infinitos seguía siendo una constante en todas las teorías. Ante esta situación, algunos físicos decidieron cambiar de campo de trabajo; unos pocos, incluso, abandonaron totalmente la física. Dirac no fue ajeno a esta situación. Al igual que algunos de sus colegas, estaba convencido de que era necesario un cambio radical en la teoría existente. Durante el resto de su vida estuvo intentando encontrar dicho cambio, sin conseguirlo. Quizá, por haber sido el «artífice» en poner las primeras piedras de la electrodinámica cuántica, la sensación de frustración fue para él aún mayor que la sufrida por muchos de sus colegas. Recuérdese que el otro fundador de la teoría cuántica de la radiación, Jordan, llegó a abandonar la física.

En el caso de Dirac, su percepción de la electrodinámica cuántica se transformó completamente en muy poco tiempo. A principios de 1935, un año después de su teoría del positrón, mostraba una posición ambivalente, manteniendo aún una cierta confianza en la teoría:

> La electrodinámica cuántica no puede considerarse realmente una teoría satisfactoria; sin embargo, aún mantiene algunas propiedades dignas de mención: es una teoría invariante relativista, un resultado muy sorprendente.

Menos de un año después, su confianza había desaparecido por completo, y ello le llevó a convertirse en el mayor crítico de la teo-

ría. En su afán por atacar la teoría existente llegó a contradecirse a sí mismo en muchos aspectos que habían contribuido, sin lugar a dudas, en convertirlo en una de las figuras prominentes de la física.

En 1936 Dirac escribió las palabras que están reproducidas al comienzo del presente capítulo, en las cuales abogó por el abandono, sin pesar alguno, de la electrodinámica cuántica. El origen de estas palabras se encuentra en el experimento realizado a finales de 1935 por el físico americano Robert S. Shankland (1908-1982). Los resultados de este experimento, que parecían poner en duda el principio de conservación de la energía en los procesos atómicos, fueron usados por Dirac para lanzar un demoledor ataque sobre la teoría cuántica de la radiación. En palabras del propio Dirac, el experimento de Shankland implicaba «el abandono de la electrodinámica cuántica y de los neutrinos». Su concepción sobre el neutrino, la hipotética partícula cuya existencia fue postulada por Pauli en 1930 para explicar el proceso de desintegración beta, también cambió radicalmente en dos años.

El experimento de Shankland supuso un profundo cambio, no solo en las ideas de Dirac, sino también en su forma de hacer física. Por primera vez, Dirac aceptó sin reserva alguna los resultados de un experimento sin contrastar, porque ello le permitía justificar sus ideas y conclusiones preconcebidas. Dirac decidió tomar una senda radical, un camino por el que ningún otro físico le acompañaría. A pesar de conocer que el experimento de Shankland, en el caso de confirmarse sus resultados, significaría la invalidación no solo de la electrodinámica cuántica, sino también del principio de incertidumbre de Heisenberg y, consecuentemente, de la propia mecánica cuántica no relativista, Dirac siguió adelante y decidió publicar sus ideas en un nuevo trabajo que tituló «¿Se conserva la energía en procesos atómicos?».

Muchos colegas criticaron severamente su trabajo y, sobre todo, su actitud, que consideraron totalmente incoherente con su trayectoria previa. Heisenberg calificó el trabajo de Dirac como «inmensa estupidez», y Bohr señaló las terribles implicaciones que traería consigo la no conservación de la energía. Es interesante comprobar cómo las posiciones de Bohr y Dirac en 1936 eran la imagen especular de las que habían mantenido unos cinco

años antes, cuando Bohr, en un acto de desesperación, llegó a poner en duda el principio de conservación de la energía para poder explicar el proceso de decaimiento beta, mientras que Dirac prefería incluso abandonar la imagen discontinua de la materia antes que la propiedad de conservación de la energía.

Durante los siguientes años, Dirac atacó el problema de los resultados infinitos desde muy distintas perspectivas; intentó encontrar una nueva formulación de la teoría clásica de la radiación que pudiese extenderse después al mundo cuántico, desarrolló nuevas técnicas matemáticas con el fin de hacer desaparecer las integrales divergentes, y llegó incluso a construir una nueva teoría introduciendo la idea de un «hipotético mundo». Pauli, el gran crítico de las teorías de Dirac, expresó claramente sus objeciones en la conferencia que impartió cuando le concedieron el premio Nobel:

> Una teoría correcta no debe conducir a energías o cargas infinitas, no debe hacer uso de trucos matemáticos para sustraer infinitos o singularidades, no debe inventar un mundo hipotético, que es solo una ficción matemática, antes de ser capaz de formular una interpretación correcta del mundo de la física.

Todo un ataque a la situación de la electrodinámica cuántica, que Dirac aceptaría sin reservas, pero también una severa crítica al camino emprendido por el propio Dirac.

DIRAC Y LA «NUEVA» ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

A finales de la década de 1940 la situación de la electrodinámica cuántica cambió significativamente con los trabajos de Feynman, Schwinger y Tomonaga. En ellos se elaboró el programa de renormalización, procedimiento que permitía sustraer los resultados infinitos proporcionando respuestas no ambiguas que podían compararse con las evidencias experimentales. La nueva electrodinámica cuántica fue desarrollada de forma independiente por los tres físicos con un procedimiento bastante conservador: la teo-

ría cuántica relativista seguía siendo el marco general de la nueva teoría y el método de perturbaciones era el procedimiento adecuado para obtener resultados. No era el cambio revolucionario que Dirac y algunos otros físicos propugnaban. En 1948 Freeman Dyson (n. 1923) demostró que las tres nuevas formulaciones de la electrodinámica cuántica eran equivalentes.

Es interesante mencionar que la filosofía de la nueva electrodinámica cuántica seguía de cerca las ideas desarrolladas por Dirac algunos años antes. Así lo expresó Schwinger:

> La interacción entre la materia y la radiación produce una renormalización de la carga y masa del electrón, estando todas las divergencias contenidas en los factores de renormalización.

Feynman, por su parte, manifestó:

> A través del método de renormalización de la carga y masa disponemos de una electrodinámica consistente que nos permite el cálculo de todos los posibles procesos en los que se hallan implicados fotones, electrones y positrones.

A finales de la década de 1940, Weisskopf pudo declarar con gran satisfacción: «La guerra contra los infinitos ha terminado por fin», opinión compartida por la mayoría de los físicos, pero no por todos.

Dirac, aun siendo consciente de los espectaculares éxitos de la nueva teoría, nunca pudo aceptar la forma en la que se eliminaban los infinitos. Esta posición la mantuvo durante toda su vida. En la década de 1950 señaló que los problemas de la electrodinámica cuántica no habían sido resueltos por la nueva teoría de renormalización. En su opinión, lo que realmente se necesitaba era «un cambio en los conceptos fundamentales, al igual que sucedió en 1925 con la irrupción de la mecánica cuántica». A mediados de la década de 1970, escribió:

> Muchos físicos se encuentran muy satisfechos con la electrodinámica cuántica. Por el contrario, para mí es una situación muy insatis-

factoria. La nueva teoría elimina resultados infinitos de una forma totalmente arbitraria. Las matemáticas nos enseñan que debemos eliminar una cantidad cuando es pequeña, no cuando es infinitamente grande y no deseamos mantenerla.

Incluso, cuando le preguntaron cómo podía mantener esa total oposición a la nueva teoría, a pesar de la increíble precisión con la que describía propiedades básicas del electrón, su respuesta fue:

El precio que uno tenía que pagar por tal éxito era abandonar la deducción lógica y reemplazarla por una serie de reglas operativas.

LA «INHUMANA» PRECISIÓN DE LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

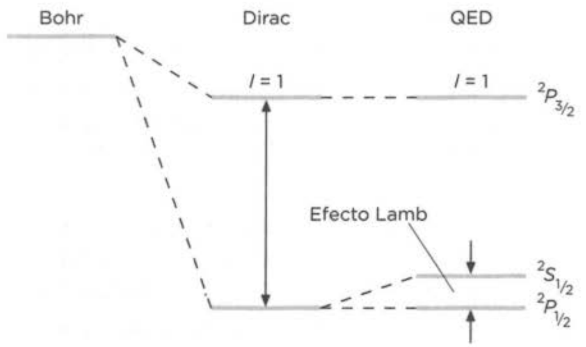
Esta es la expresión que introdujo John Horgan en su libro *The End of Science* para referirse a la comparación entre determinadas evidencias experimentales y los resultados teóricos proporcionados por la electrodinámica cuántica (QED). El acuerdo era en algunos casos del orden de una parte en 10^9 o incluso 10^{12}. Señalemos a continuación algunas magnitudes físicas que han podido ser medidas con una precisión enorme y comparemos estas evidencias con los resultados de la electrodinámica cuántica. Consideremos el momento magnético del electrón (magnitud relacionada directamente con la propiedad de espín). El valor experimental (en ciertas unidades) es $\mu^{exp}(e) = 1{,}0011596521884$. El resultado que proporciona la ecuación de Dirac es $\mu^{Dirac}(e)=1$, es decir, reproduce el valor experimental con una precisión del 1% (una parte en 10^2). Sin embargo, el electrón emite fotones virtuales que se reabsorben o polarizan el vacío. Este tipo de procesos, denominados «correcciones radiativas», no están incluidos en la ecuación de Dirac, pero pueden calcularse a través de la QED. El valor teórico que proporciona es $\mu^{QED}(e)=1{,}001159652140$. Obsérvese que la diferencia entre la medida experimental y el valor teórico aparece en la undécima cifra decimal. Un acuerdo similar se obtiene para otras partículas elementales como el muón. Consideremos a continuación una propiedad relacionada con el átomo de hidrógeno. Se trata de la diferencia de energía entre dos estados determinados. Haciendo uso de la ecuación de Dirac, los estados mencionados son degenerados en energía, es decir, tienen exactamente la misma energía. Sin embargo, las medidas experimentales muestran una pequeña diferencia, denominada «efecto Lamb» (véase la figura) que viene dada (en ciertas unidades)

Un precio demasiado alto, y ningún físico debería sentirse satisfecho de pagarlo.

El último artículo escrito por Dirac apareció como parte del libro que se publicó en su memoria en 1987, tres años después de su fallecimiento. El título del trabajo es «Las deficiencias de la teoría cuántica de campos», toda una declaración de principios. Su última valoración sobre la electrodinámica cuántica fue la siguiente:

Estas reglas de renormalización producen un acuerdo sorprendente, excesivamente bueno, con los experimentos. Muchos físicos consi-

por: $\Delta E^{exp} = 1057851$. El valor proporcionado por la QED es: $\Delta E^{QED} = 1057862$. La diferencia se muestra en el sexto dígito, pero es importante mencionar que estos valores para la diferencia energética entre niveles son aproximadamente una parte en un millón en comparación con las energías de los propios niveles energéticos. Así pues, en relación a ellos, la precisión de la QED sería de una parte en 10^{12}. Para hacerse una idea de esta precisión, es interesante considerar situaciones más directamente relacionadas con nuestra vida cotidiana. Considérese, por ejemplo, la distancia existente entre Madrid y Nueva York, unos 6000 km aproximadamente. La precisión de los cálculos de la QED nos muestra que dicha distancia la podríamos estimar hasta el límite de la centésima o milésima del milímetro, es decir, menos que el grosor del cabello humano.



> deran que estas reglas operativas son por tanto correctas. En mi opinión, esta no es una razón adecuada. El hecho de que los resultados estén de acuerdo con los experimentos no prueba que la teoría sea correcta. [...] Deseo señalar una vez más que muchas de estas modernas teorías cuánticas de campos no son fiables, y esto es así, aunque mucha gente trabaje con ellas y obtengan en algunas ocasiones resultados precisos.

Regresemos a la fotografía mencionada al comienzo de este capítulo, que nos muestra a Dirac escuchando, con aparente indiferencia, lo que Feynman le está diciendo. En el fondo, Feynman compartía algunas de las preocupaciones de Dirac sobre el tratamiento de los resultados infinitos, y así lo expresó él mismo:

> Sospecho que la renormalización no es una técnica matemática legítima. Aún no disponemos de un buen procedimiento matemático para describir la teoría de la electrodinámica cuántica.

Sin embargo, aquí termina el acuerdo entre los dos físicos en su percepción de la nueva teoría. Para Feynman, esta era «nuestra posesión más preciada», y señaló:

> La cuestión no es que la teoría sea agradable filosóficamente, o fácil de entender, o perfectamente razonable desde el punto de vista del sentido común. Lo realmente importante es que las predicciones de la teoría estén en acuerdo con el experimento. [...] La descripción de la naturaleza que proporciona la electrodinámica cuántica es aparentemente absurda, pero está en perfecto acuerdo con el experimento. Así pues, espero que puedan aceptar la naturaleza tal como es —absurda—.

Dirac nunca pudo aceptar estas conclusiones y, por ello, siempre intentó encontrar una nueva formulación. A pesar de estas diferencias, la admiración entre ambos físicos fue recíproca, y Feynman siempre consideró a Dirac como su «héroe» más especial en física, tal y como señaló en la conferencia que impartió en 1986 en homenaje a Paul Dirac.

CAPÍTULO 5

Tras los grandes hallazgos

El monopolo magnético fue introducido por Dirac en 1931, aunque se consideró un trabajo menor en su producción científica. En los años siguientes, y al igual que sucedería con muchos de los físicos de su generación, el impacto de sus trabajos ya fue muy limitado. Sin embargo, Dirac mantuvo una actividad de investigación continua, publicando artículos periódicamente hasta poco antes de su fallecimiento.

Después de 1934 ninguna publicación de Dirac tuvo el impacto ni alcanzó la originalidad de sus trabajos previos. No obstante, siguió publicando artículos de investigación de forma regular durante toda su vida. Aparte de sus continuos intentos por encontrar una formulación alternativa a la electrodinámica cuántica, exploró otros campos, como el de la cosmología. También colaboró puntualmente en algunos trabajos experimentales (con su gran amigo Kapitsa) y participó, durante los años de guerra, en proyectos con un marcado carácter militar. En este capítulo solo describimos brevemente su teoría del monopolo magnético y sus ideas sobre cosmología.

Desde un punto de vista más personal, los cincuenta años que comprende el período 1934-1984 trajeron consigo importantes cambios en la vida de Dirac: la muerte de su padre en 1936, que consideró como una «liberación»; su matrimonio en 1937 y sus hijos, su traslado a Florida. Dirac siguió centrándose en su trabajo científico, pero tuvo que aprender a compaginarlo con sus nuevas responsabilidades familiares. La relación con sus colegas, especialmente los alemanes y rusos, también se vio afectada por los terribles años de la Segunda Guerra Mundial y el difícil período de la Guerra Fría. Fueron los años en los que Dirac comenzó con sus continuas alusiones al «principio de la belleza matemática», lema que Dirac terminó considerando su credo máximo, el princi-

pio generador de todos sus descubrimientos científicos. ¿Sucedió realmente así?

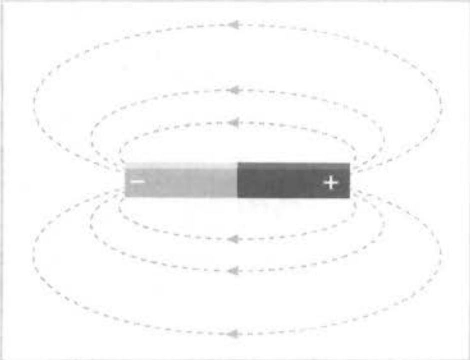
Dirac es uno de los más grandes físicos de la historia y, sin embargo, continúa siendo un gran desconocido. Su trabajo fue el punto de partida de la construcción de la física presente. Su legado de la antimateria trascendió su propia figura; ¿quién no se ha entretenido leyendo libros de ciencia ficción o viendo películas donde la antimateria es el personaje principal? Y sobre todo, ¿quién podía imaginar que las antipartículas harían posible el desarrollo de nuevas técnicas médicas que tanta trascendencia tienen para la sociedad?

EL MONOPOLO MAGNÉTICO

En la escuela se nos enseña que un imán siempre tiene dos polos. Si un imán se divide en dos o más fragmentos, cada uno de ellos sigue teniendo los dos polos. Así pues, parece concluirse que no existen imanes con un solo polo magnético. Sin embargo, ¿es concluyente esta afirmación? Al igual que existe el electrón, partícula portadora de la carga eléctrica elemental, podría introducirse el monopolo magnético como la partícula portadora de una carga magnética aislada, es decir, podría considerarse como un imán con un solo polo. Dirac desarrolló su teoría del monopolo magnético en su trabajo de mayo de 1931, el mismo en el que introdujo la idea del antielectrón.

La idea del monopolo magnético no fue original de Dirac. Muchos años antes, en el siglo XIX, algunos físicos consideraron su posible existencia, aun siendo conscientes de que ello implicaba una clara contradicción con las ecuaciones fundamentales del electromagnetismo clásico. Las ecuaciones de Maxwell muestran una clara asimetría entre el campo eléctrico, relacionado con una densidad de carga y corriente eléctricas, y el campo magnético, para el cual no están definidas tales magnitudes. Este hecho, además, es consistente con la introducción de un potencial de tipo vector para describir el campo magnético, procedimiento que se

extendió a la teoría cuántica a través de los trabajos de Jordan, Heisenberg y Pauli. Esto explica que las cargas magnéticas nunca fuesen consideradas en el contexto de la teoría cuántica antes del trabajo desarrollado por Dirac en 1931.



Representación de un imán con sus dos polos magnéticos y las líneas de flujo que ilustran el campo magnético existente.

El objetivo que se planteó Dirac no fue probar la existencia del monopolo, sino encontrar una explicación de la «cuantización» de la carga eléctrica, y justificar el valor de la constante de estructura fina. Él mismo lo expresó: «Este trabajo trata fundamentalmente de la existencia de una carga eléctrica mínima». Dirac introdujo una densidad de carga magnética y una densidad de corriente magnética, por similitud con las correspondientes magnitudes eléctricas, y mostró que la teoría cuántica «no excluía la existencia de polos magnéticos aislados».

Más aún, Dirac obtuvo una relación muy sencilla entre el valor de la carga eléctrica y la magnética. Esta relación involucraba la constante de Planck y ponía de manifiesto que la existencia del monopolo magnético implicaba la condición de cuantización para la carga eléctrica. A pesar de esta sencilla relación, Dirac consideró el resultado «bastante decepcionante». Lo que él buscaba era una condición cuántica que le hubiese permitido determinar directamente la carga elemental. Sin embargo, usando sus propias palabras:

> No es posible modificar la teoría, puesto que no contiene ningún aspecto arbitrario. La explicación del valor de la carga eléctrica elemental requerirá alguna idea totalmente novedosa.

Dirac finalizó su trabajo preguntándose por qué no se habían observado polos magnéticos aislados. La relación entre la carga eléctrica y la magnética que había encontrado le permitió estimar el valor mínimo de la carga magnética a partir de la carga del electrón. El resultado que obtuvo fue:

LA EVOLUCIÓN DEL MONOPOLO MAGNÉTICO

El trabajo de Dirac sobre los monopolos magnéticos recibió alguna mención en la prensa, pero, en general, fue ignorado por la comunidad científica. El propio Dirac solo volvió a considerar el tema bastantes años después, en 1948. Posteriormente, mantuvo una posición muy distante, incluso cuando comenzaron a surgir noticias sobre la detección experimental de los monopolos y, ya en las décadas de 1970-1980, las denominadas «teorías de gran unificación» introdujeron de nuevo la idea del polo magnético aislado. La mayoría de los experimentos resultaron fallidos. Sin embargo, en 1982, el físico español Blas Cabrera, profesor en la Universidad de Stanford (California), sorprendió a la comunidad científica notificando que había detectado una evidencia clara relacionada con la existencia del monopolo magnético. Su resultado no pudo refutarse, pero tampoco confirmarse. Por consiguiente, la existencia de la «hipotética» nueva partícula no fue aceptada. Hasta el día de hoy, puede afirmarse que no existe evidencia experimental clara de la existencia de los monopolos magnéticos.

$$M_{min} = \frac{137e}{2},$$

es decir, la carga magnética era aproximadamente setenta veces superior a la carga eléctrica elemental. Dirac interpretó este valor como resultado de la presencia de una fuerza atractiva muy intensa entre polos magnéticos de distinto signo, lo que explicaba la gran dificultad en separarlos y, consecuentemente, el hecho de que no se hubiesen detectado.

LAS CONSTANTES COSMOLÓGICAS

Dirac seguramente conocía los trabajos previos realizados en el ámbito de la cosmología, pero no mostró ningún interés especial en este campo hasta 1937, año en que publicó un pequeño trabajo en la revista *Nature* con el título «Las constantes cosmológicas». El trabajo de Dirac tomó como punto de partida la hipótesis de

Lemaître: «El universo se originó en un pasado remoto y se encontraba en fase de expansión». La idea fundamental de Dirac fue explorar la posibilidad de que las constantes fundamentales de la naturaleza no fuesen realmente constantes, sino que dependiesen del tiempo en una escala cosmológica. Para ello, Dirac introdujo ciertas «cantidades» enormes correspondientes a diversas magnitudes relacionadas con la descripción del universo a gran escala, y sugirió que debía existir una relación sencilla entre las mismas. Los «números» con los que trabajó Dirac fueron los siguientes:

1. La edad del universo en relación a la unidad atómica de tiempo (tiempo que la luz tarda en recorrer el diámetro del electrón clásico): $\sim 2\times 10^{39}$.

2. La relación entre la fuerza eléctrica y gravitatoria existentes entre un electrón y un protón: $\sim 10^{39}$.

3. El número total de protones más neutrones en el universo: $\sim 10^{78}$.

Dirac estaba convencido de que la relación entre estos enormes números no era fortuita y, además, consideró que tales cantidades dependían de la historia del universo:

> Los grandes números mencionados deben considerarse no como constantes, sino como simples funciones de nuestra época presente. Es un principio general que estos grandes números que describen la teoría física deben ser iguales a potencias sucesivas del tiempo expresado en unidades atómicas.

Dirac llamó a este principio «la hipótesis de los grandes números». La idea básica contenida en la misma era que para dos números grandes cualesquiera en la naturaleza, siempre existía una relación matemática simple entre ellos, en la cual los coeficientes eran del orden de la unidad.

Dirac llevó hasta las últimas consecuencias su hipótesis y concluyó su trabajo señalando que la constante general de gra-

PIONEROS DE LA COSMOLOGÍA FÍSICA


El físico ruso Alexander Friedmann.

En la década de 1930 la cosmología se encontraba en plena revolución. En 1929 el físico estadounidense Edwin Hubble (1889-1953), tras analizar cuidadosamente una ingente cantidad de datos observacionales, concluyó que el universo estaba en expansión. Las galaxias se separaban unas de otras a velocidades tanto mayores cuanto más alejadas se encontraban entre sí. Hubble introdujo una relación lineal entre la velocidad y la distancia: $v = H \cdot d$. Hoy día se denomina «constante de Hubble» al coeficiente de proporcionalidad. Las evidencias experimentales de Hubble eran consistentes con estudios realizados algunos años antes por Alexander Friedmann (1888-1925) y Georges Lemaître (1894-1966), quienes comprobaron que la teoría general de la relatividad contenía soluciones correspondientes a un universo en expansión. Es interesante mencionar que Lemaître coincidió con Dirac en Cambridge a mediados de la década de 1920, cuando ambos eran estudiantes.

vitación presentaba una dependencia con el inverso del tiempo. Además, el número total de nucleones (protones y neutrones) en el universo aumentaba con el cuadrado del tiempo, y por último, la edad del universo y la constante de Hubble satisfacían la siguiente relación:

$$t = \frac{1}{3H}.$$

El trabajo de Dirac, que estaba en conflicto con la teoría de Einstein (la constante cosmológica no depende del tiempo), recibió muy poco interés por parte de la comunidad. Para muchos físicos del campo de la cosmología se trataba básicamente de

numerología. Sus colegas «cuánticos» mostraron la más absoluta indiferencia.

Dirac escribió un segundo trabajo más extenso en 1938, para luego abandonar el tema hasta 1972. A partir de ese año comenzó a publicar de forma periódica sobre el mismo hasta poco antes de su fallecimiento. En todos estos trabajos siguió desarrollando su hipótesis de los grandes números, intentando compaginar sus predicciones con las nuevas evidencias experimentales que se habían descubierto, por ejemplo, la medición de la radiación de fondo universal, una señal inequívoca del Big Bang.

> «Las matemáticas me han conducido por caminos inesperados, que ofrecen nuevas vistas y conducen a un nuevo territorio, donde se puede establecer una base de operaciones desde donde estudiar el entorno y el progreso del plan futuro.»
>
> — Paul Dirac.

Mención especial merecen los trabajos que desarrolló Dirac durante la década de 1950, en los que intentó extender la formulación hamiltoniana a la teoría general de la relatividad. El objetivo esencial era encontrar una teoría cuántica para la gravitación. Aunque Dirac no tuvo éxito en el empeño (aún hoy los físicos trabajan arduamente intentando encontrar tal formulación), es interesante mencionar que el nombre de «gravitón», el cuanto para la interacción gravitatoria (similar al fotón en el caso de la interacción electromagnética), fue introducido por Dirac en la reunión de la American Physical Society que tuvo lugar en Nueva York en 1959.

TRABAJOS Y VIAJES

A partir de 1934 la vida de Dirac siguió básicamente el mismo patrón que los años anteriores: trabajo y viajes continuos. En los años previos a la Segunda Guerra Mundial, entre otros países, visitó en varias ocasiones Estados Unidos y la Unión Soviética. En el primer

caso, realizó varias estancias en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Allí conoció a Margit Wigner, hermana del físico húngaro Eugene P. Wigner, con quien se casó a comienzos de 1937.

Respecto a la Unión Soviética, la relación de Dirac con algunos físicos de ese país fue muy especial. Mantuvo colaboraciones científicas muy estrechas con Tam, Fock y Kapitsa, a quienes visitó en tres ocasiones durante el período 1934-1937, en la segunda de las cuales (que tuvo lugar el verano de 1936) se produjo la muerte de su padre. Sin embargo, Dirac no pudo volver a la URSS hasta el año 1955, una vez hubo desaparecido Stalin.

Durante los años de guerra, Dirac participó en algunos proyectos militares, aunque su grado de implicación fue, en general, bastante menor que el de algunos de sus colegas. Realizó diversos estudios y cálculos relacionados con la separación de isótopos radiactivos, pero rehusó participar directamente en el Proyecto Manhattan cuando este comenzó a desarrollarse en Estados Unidos. En Cambridge, Dirac continuó con sus investigaciones en física teórica, mientras muchos de sus colegas trabajaban directamente en proyectos militares. La mayoría de ellos (procedentes de muy distintos países de Europa) decidieron quedarse en Estados Unidos tras el final de la guerra.

Los años posteriores vieron el comienzo de la Guerra Fría (a partir de 1948) y el denominado período del «macarthismo» (1950-1956) en Estados Unidos. Por una parte, la relación de Dirac con sus colegas soviéticos básicamente desapareció durante algunos años; por otra, sus frecuentes contactos y visitas a la Unión Soviética durante la década de 1930 le acarrearon diversos problemas con las autoridades estadounidenses. Así se explica que le fuese denegado el visado para visitar Estados Unidos en 1954. Para algunos de sus colegas europeos, e incluso americanos, los problemas fueron mucho más dramáticos: Robert Oppenheimer fue directamente acusado y sometido a juicio.

Dirac reanudó sus viajes por todo el mundo a partir de 1955, con estancias prolongadas en Estados Unidos. Durante todos estos años participó muy activamente en congresos científicos, reuniones, conferencias, etc., pero manteniéndose siempre alejado de la atención pública. En 1969, después de ocupar la Cátedra

KAPITSA Y LOS DIRAC



Sin ninguna duda, el físico con quien Dirac tuvo una relación personal más intensa fue Piotr Kapitsa. Desde que se conocieron en Cambridge, en la década de 1920, ambos congeniaron hasta el extremo de que Dirac aceptó colaborar con Kapitsa en un trabajo experimental. A partir de 1934 las visitas de Dirac a la URSS fueron muy especiales para Kapitsa, a quien se le había prohibido salir del país. Quizá la mejor forma de percibir la especial relación entre ambos físicos es expresarlo a través de las palabras de la esposa de Dirac: «En 1937 Dirac me llevó a Rusia, donde visitamos a su querido y maravilloso amigo Piotr Kapitsa. Él se convirtió en el héroe de mi vida, el único gran hombre que tuvo la valentía suficiente para decir "no" al mismo Stalin, [...] un amigo inolvidable a quien ambos quisimos y apreciamos enormemente». Kapitsa, que falleció en 1984, recibió el premio Nobel de Física en 1978.

Lucasiana en Cambridge durante treinta y siete años, decidió retirarse. Ese mismo año se trasladó a Estados Unidos donde estuvo contratado en varias universidades. Finalmente, en 1971 aceptó una cátedra en la Universidad Estatal de Florida, en Tallahassee, puesto donde permaneció hasta su fallecimiento en 1984.

Durante los años en Florida, Dirac mantuvo una actividad continuada de investigación, publicando periódicamente artículos científicos. Al contrario de sus años en Cambridge, donde solo iba a la universidad para las clases y seminarios, realizando la mayor parte de su trabajo en casa, en Florida Dirac se involucró mucho más directamente en las actividades académicas. No solo trabajaba la mayor parte del día en su despacho, sino que también mantuvo una relación con otros profesores y colegas mucho más fluida de lo que había sido la norma general durante toda su vida.

EL PRINCIPIO DE LA BELLEZA MATEMÁTICA

En 1956, durante una visita a la Universidad de Moscú, se le pidió a Dirac, al igual que ya se había hecho con otros insignes visitantes, que escribiese en la pizarra una frase representativa de su trabajo, frase que se mantendría para la posteridad. Dirac escribió: «Una ley física debe poseer belleza matemática». Esta inscripción recoge la principal línea de pensamiento de Dirac a partir de mediados de la década de 1930. Este lema, al cual Dirac hizo referencia toda su vida, se transformó en lo que hoy se conoce como el «principio de la belleza matemática en la física». Este es el principio que llevó a Dirac a rechazar durante toda su vida los avances de la electrodinámica cuántica a pesar de ser capaz de describir las evidencias experimentales con una precisión nunca antes alcanzada. Es también el principio que le hizo mantener su teoría de las constantes cosmológicas aun cuando estaba en clara contradicción con los datos experimentales.

El principio de la belleza matemática llegó a convertirse para Dirac en el lema, en el credo esencial de todo su pensamiento científico. De hecho, la obsesión de Dirac por este principio le impidió desarrollar teorías de mayor originalidad. La dificultad principal con el nuevo «credo» de Dirac, como con cualquier otro principio de tipo estético, es su carácter subjetivo y, por consiguiente, la imposibilidad de usarlo como guía básica en el desarrollo de la ciencia. Dirac nunca pudo definir su concepto de la belleza matemática en una forma satisfactoria.

Cuando se le preguntó si belleza y simplicidad podían considerarse equivalentes, manifestó que la relación entre las matemáticas y la física era algo más profundo que el propio principio de simplicidad y puso como ejemplo las teorías de Newton y Einstein:

> La teoría de Newton es mucho más simple que la teoría de la gravitación de Einstein. Sin embargo, la teoría de Einstein es mejor, más profunda y más general. La belleza matemática, y no la simplicidad, es lo que caracteriza la teoría de la relatividad, y este es el concepto fundamental en la relación existente entre la física y la matemática.



FOTO SUPERIOR:
Paul Dirac fotografiado en 1962 en el curso de una conferencia en la Universidad Yeshiva de Nueva York.

FOTO INFERIOR:
Dos viejos conocidos del mundo de la física: Werner Heisenberg, a la derecha, conversa con Paul Dirac en la 18.ª convención anual de premios Nobel celebrada en la ciudad alemana de Lindau en 1968.



Se ha comentado que el principio de la belleza matemática fue el «motor» de los trabajos científicos de Dirac, la «fuerza generatriz» de su gran innovación y de sus sorprendentes descubrimientos en física fundamental. Pero, en realidad, no fue así. Es incuestionable que para Dirac la forma de hacer física fue a través del uso de la matemática. Este era el lenguaje de la física y, por tanto, el camino que un investigador debía seguir para descubrir los secretos de la naturaleza. El juego con las ecuaciones es la forma en la que Dirac se enfrentó a los problemas, un método que llenó de perplejidad a muchos de sus colegas, no acostumbrados a tal forma de proceder. Recuérdese que Dirac siempre criticó la forma de hacer física de Bohr, entre otros, por no tener suficiente base y soporte matemático. Todos los trabajos de Dirac seguían el mismo patrón: claridad y precisión conceptual, términos concisos y una poderosa y sólida base matemática.

«La belleza matemática es una cualidad que no puede definirse, de la misma forma que sucede en el arte, pero que la gente que estudia matemáticas no tiene ninguna dificultad en apreciar.»

— Paul Dirac.

El período de máxima creatividad y originalidad de Dirac (su período heroico) no contiene ninguna alusión al principio de la belleza matemática. En aquellos años, lo esencial para Dirac era describir los problemas físicos de forma precisa, lo cual significaba disponer de una formulación matemática sólida y consistente. Este era el único camino para encontrar las respuestas. En aquel período, una formulación matemática consistente no era contradictoria con el uso de métodos aproximados. Dirac, quizá por su formación en ingeniería, valoraba este tipo de procedimientos y los consideraba completamente válidos como forma de resolver problemas concretos.

Las primeras alusiones al concepto de belleza matemática surgieron a partir de 1934; se trataba de una clara respuesta a la frustración y profundo desengaño que Dirac sintió por la electrodinámica cuántica. En los años siguientes, este principio se con-

virtió en una obsesión, una forma de creencia religiosa (en sus propias palabras), algo que le impidió valorar otros descubrimientos de la física y que llegó a convertirse en un verdadero obstáculo para su propia creatividad.

La idea de belleza matemática llegó a dominar todo su pensamiento, y esta idea preconcebida modificó su forma de analizar los problemas físicos. El método solo tenía sentido si se ajustaba a su idea de «belleza», y los resultados solo eran válidos si se habían obtenido siguiendo dicho principio «religioso». Una actitud poco abierta que tiende a alejarse del famoso método científico. No resulta irrelevante señalar que los trabajos de Dirac comenzaron a perder impacto y originalidad a partir del momento en el que el principio de la belleza matemática se convirtió en el credo de su pensamiento científico.

EL LEGADO DE DIRAC

De todos los grandes físicos, Dirac fue probablemente el menos filosófico. Nunca escribió ningún texto en el que expusiese sus ideas sobre la filosofía de la ciencia, o el método científico, o la relación de la ciencia con la sociedad. Siempre mantuvo una privacidad extrema y rehuyó continuamente el contacto social y, sobre todo, el estar bajo los focos de la atención pública. Esto explica el gran desconocimiento sobre su figura. Su nombre sigue siendo desconocido para una inmensa mayoría de personas. Seguramente, esto es lo que siempre quiso el propio Dirac. Aunque su figura no sea conocida a nivel social, su obra ha modificado completamente el panorama de la física. Las teorías más actuales tienen su origen en sus trabajos. No es equivocado afirmar que muy pocos investigadores han tenido mayor influencia en la construcción de la física fundamental presente. Él contribuyó, con muchos otros colegas, a la construcción de la mecánica cuántica, pero fue el primero en poner los cimientos de la teoría cuántica que describe la interacción entre la radiación y la materia.

Dirac fue conocido como «el teórico de los teóricos», y algunos de sus descubrimientos llenaron de asombro a todos sus colegas. Con el paso del tiempo, su obra alcanzaría tal fama que hasta el propio nombre del autor quedaría ensombrecido frente a su creación. Esto fue lo que sucedió con el descubrimiento de la antimateria, hallazgo que Heisenberg consideró como «quizá el salto más grande de todos los grandes saltos de la física de nuestro siglo». Antimateria: concepto que produjo una «explosión» en la literatura de ciencia ficción, y cuyas aplicaciones eran difíciles de prever.

Seguramente habrán oído hablar de universos y antiuniversos, de partículas y antipartículas que se aniquilan produciendo una enorme cantidad de energía; habrán leído sobre la producción de antiátomos y sobre la creación, por la secta de los Illuminati, del arma más mortífera jamás creada; habrán visto en la televisión o en el cine naves interestelares, como el *Enterprise* de la serie *Star Trek*, desplazándose a la velocidad de la luz gracias a sus propulsores de antimateria; serán conscientes, quizá incluso por propia experiencia, de la existencia de ciertas técnicas médicas como el PET (Tomografía de Emisión de Positrones). Cuando piensen en todo ello, sea realidad o ficción, acuérdense de un «desconocido» físico inglés llamado Paul Dirac. Él fue quien dio comienzo a todo.

Lecturas recomendadas

BASELGA, S., *Dirac. La belleza matemática*, Madrid, Nivola, 2008.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza, 2007.

GRIBBIN J., *En busca del gato de Schrödinger*, Barcelona, Salvat, 1994.

—: *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

HOOFT, G., *Partículas elementales*, Barcelona, Drakontos, 2008.

KRAGH, H.S., *Generaciones cuánticas: una historia de la física en el siglo* XX, Madrid, Akal, 2007.

PENROSE, R., *El camino a la realidad*, Madrid, Debate, 2006.

ROSENBLUM B. Y KUTTNER F., *El enigma cuántico*, Barcelona, Tusquets, 2012.

SÁNCHEZ, J.L. Y CASSINELLO A., *La realidad cuántica*, Barcelona, Crítica, 2012.

SÁNCHEZ, J.M., *Historia de la física cuántica*, Barcelona, Crítica, 2001.

TERESI D. Y LEDERMAN L., *La partícula divina*, Barcelona, Drakontos, 2007.

YNDURÁIN, F.J., *Electrones, neutrinos y quarks*, Barcelona, Crítica, 2011.

—: *Teorías unificadas y constituyentes fundamentales de la materia*, Madrid, Espasa Calpe, 1988.

Índice